



TUGAS AKHIR - TF 141581

**AUDIT ENERGI PADA *DRY PROCESS ROTARY*
KILN SYSTEM DI PABRIK SEMEN**

RISKA AYU
NRP. 2412 100 012

Dosen Pembimbing
Harsono Hadi, PhD
Ir. Sarwono, MM

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TF 141581

ENERGY AUDITING FOR DRY PROCESS ROTARY KILN SYSTEM IN CEMENT INDUSTRIES

RISKA AYU
NRP. 2412 100 012

Supervisor
Harsono Hadi, PhD
Ir. Sarwono, MM

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

**AUDIT ENERGI PADA *DRY PROCESS*
ROTARY KILN SYSTEM DI PABRIK SEMEN**

TUGAS AKHIR

Oleh :
RISKA AYU
NRP : 2412 100 012

Sorabaya, Januari 2016
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I



Harsono Hadi, Ph.D

NIP. 19600119 198611 1 001

Pembimbing II



Ir. Sarwono, MM

NIP. 19580530 198303 1 002

Ketua Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhammad Harta, ST, Msi, Ph.D

NIPN. 19780902 200312 1 002

**AUDIT ENERGI PADA DRY PROCESS
ROTARY KILN SYSTEM DI PABRIK SEMEN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Bidang Studi Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RISKA AYU

NRP. 2412 100 012

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Harsono Hadi, Ph.D (Pembimbing I)
2. Ir. Sarwono, MM (Pembimbing II)
3. Lizda Johar Mawarani, ST, MT (Ketua Penguji)
4. Ir. Ronny Dwi Noriyti, M.Kes (Penguji I)
5. Murry Raditya, ST, MT (Penguji II)

**SURABAYA
JANUARI 2016**

AUDIT ENERGI PADA *DRY PROCESS* *ROTARY KILN SYSTEM* DI PABRIK SEMEN

Nama Mahasiswa : Riska Ayu
NRP : 2412 100 012
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing 1 : Harsono Hadi, Ph.D
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Sarwono, MM

Abstrak

Industri semen merupakan sektor industri dengan konsumsi energi terbesar di Indonesia. Sebagai industri dengan *high energy*, industri semen membutuhkan pengelolaan energi yang baik agar dapat meminimalisir biaya produksi dan mengurangi emisi karbon yang dihasilkan. Audit energi merupakan metode untuk dapat meningkatkan efisiensi sistem, dari identifikasi *losses* yang terjadi. Pada audit energi di industri semen, dihasilkan bahwa *losses* terbesar pada gas panas buang dapat diminimalisir dengan menggunakan bahan bakar alternatif sebagai pengganti batubara. Dari penelitian ini, diketahui bahwa pabrik semen yang menjadi objek penelitian mengkonsumsi energi termal sebesar 3,76 kJ/kg-*clinker*. Nilai ini berbeda jauh dari efisiensi standar berdasarkan *benchmark* UNIDO 2014 yaitu sebesar 3,17 kJ/kg-*clinker*. Rekomendasi yang diberikan dari penelitian ini adalah dengan meningkatkan penggunaan bahan bakar sekam padi dan mengendalikan masukan udara pembakaran pada sistem (*excess air*) tidak lebih dari 20%. Selain itu, udara panas yang dibuang dengan temperatur 417°C dapat dimanfaatkan sebagai *waste heat recovery power generation* (WHRPG).

Kata kunci: semen, audit, energi, sekam padi

ENERGY AUDITING FOR DRY PROCESS ROTARY KILN SYSTEM IN CEMENT INDUSTRIES

Name : Riska Ayu
NRP : 2412 100 012
Departement : Engineering Physics
Supervisor 1 : Harsono Hadi, Ph.D
Supervisor 2 : Ir. Sarwono, MM

Abstrak

Cement manufacturing is the most energy intensive industries in Indonesia. So that necessary to control energy consumption in this sector for reducing energy cost and CO₂ emitted. This report deals with energy audit analysis to increasing the energy efficiency with identify energy wastage. It was found that the largest losses in rotary kiln system is on kiln exhaust gas that could be minimized with using rise husk or other alternative fuel to replace the coal. This kiln consumed thermal energy around 3,76 kJ/kg-clinker. The number is different with UNIDO 2014 standard that have to 3,17 kJ/kg-clinker. The conclusion to reduce energy consumption is by increasing the rise husk fuel and decreasing the excess air to the system under 20%. Other that, the plant can apply waste heat recovery power generation (WHRPG) to reuse the 417°C kiln exhaust gas.

Keywords: cement, audit, energy, rise husk

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah S.W.T, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini. Tidak lupa juga penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada keluarga dan para sahabat. Oleh karena dukungannya, penulis mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul:

AUDIT ENERGI PADA *DRY PROCESS* *ROTARY KILN SYSTEM* DI PABRIK SEMEN

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Harsono Hadi, PhD, selaku dosen pembimbing I tugas akhir ini, yang senantiasa membimbing dan mendukung selama pengerjaan tugas akhir ini.
2. Bapak Ir. Sarwono, MM selaku dosen pembimbing II tugas akhir ini, yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, Msi, Ph.D. selaku ketua jurusan Teknik Fisika ITS.
4. Bapak Ir. Ali Musyafa' M.Sc, selaku dosen wali yang selalu memberikan motivasi kepada penulis.
5. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknologi Industri, ITS.
6. Pak Bangkit, Pak Join, dan Pak Indra selaku pembimbing di pabrik yang membantu proses pengumpulan data dalam tugas akhir ini.
7. Mas Rendy dan Mbak Nisa, selaku senior yang membantu dalam memberi referensi tambahan dan semangat dalam pengerjaan tugas akhir ini.

8. Rekan-rekan F47 dan warga Teknik Fisika, FTI, ITS, yang senantiasa memberikan motivasi dan perhatian.
9. Rekan-rekan dan laboran dari Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan Teknik Fisika - ITS.
10. Teman-teman seperjuangan TA yang telah saling memotivasi dan memberikan bantuan juga do'a dalam penyelesaian laporan tugas akhir ini.
11. Teman-teman seperkumpulan Buma Dika, Husnul Chotimah, Fianti Femmilia, Ikko Fransisco dan Endah Laksmi yang selalu membantu dan mendukung saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Teman-teman BEM FTI ITS 2013/2014 dan 2014/2015 yang selalu memberi dukungan, do'a, serta keceriaan yang menunjang kelancaran tugas akhir ini.
13. Teman-teman Pasfoto yang selalu mengingatkan saya untuk segera menyelesaikan tugas akhir.
14. Amarendra Bagus Prakoso, yang selalu memotivasi, menasehati, mengirimkan makanan dan mendukung penulis segera menyelesaikan laporan tugas akhir.
15. Dan masih banyak lagi yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran yang membangun akan penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 15 Januari 2016

Riska Ayu

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Audit Energi	5
2.2 Kesimbangan Massa dan Energi	6
2.3 Analisis Energi	7
2.4 Proses Produksi Semen	7
2.5 <i>Co-Processing</i>	8
2.6 Komponen <i>Rotary Kiln System</i>	9
2.7 Neraca Panas pada <i>Rotary Kiln System</i>	12

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahap Penelitian.....	17
3.2 Kondisi Pembakaran pada <i>Rotary Kiln</i>	18
3.3 Pehitungan Kesimalangan energi Termal.....	18

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAH

4.1 Analisa <i>Heat Balance</i> Sekam 2%.....	37
4.2 Analisa <i>Heat Balance</i> Sekam 3,4%.....	39
4.3 Analisa <i>Heat Balance</i> Sekam 4,2%.....	40
4.4 Analisa <i>Heat Balance</i> Sekam 5,7%.....	41

4.5 Analisa <i>Heat Balance</i> Perubahan Prosentase Bahan bakar Sekam Padi	43
4.6 Analisa <i>Spesific Thermal Energy Consumption</i>	45
4.7 Analisa <i>Excess Air</i>	47
4.8 Analisa Emisi CO ₂	48

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	51

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A LAMPIRAN B

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	<i>Stage Pemanasan Preheater</i>	6
Tabel 3.1	Variasi Bahan Bakar	18
Tabel 3.2	Neraca Panas <i>Rotary Kiln</i>	20
Tabel 3.3	Aliran Massa Material	20
Tabel 3.4	Analisa Bahan Bakar	21
Tabel 3.5	Prosentase O ₂ dan CO <i>Kiln Exit Gas</i>	23
Tabel 3.6	Gas Hasil Pembakaran	23
Tabel 3.7	Gas Buang Reaksi Pembakaran	25
Tabel 3.8	Prosentase Penggunaan Batubara	26
Tabel 3.9	Panas Masuk Melalui Udara	28
Tabel 3.10	Komposisi <i>Clinker</i>	29
Tabel 3.11	Hasil Pembakaran Karbon <i>Raw Material</i>	29
Tabel 3.12	Massa <i>Excess Air</i> pada <i>Exhaust Gas</i>	30
Tabel 3.13	Panas yang dikeluarkan <i>Excess Air</i>	30
Tabel 3.14	Komposisi <i>Raw Material</i>	31
Tabel 3.15	Komposisi <i>Raw Material</i> (Tanpa Debu).....	32
Tabel 3.16	Data Pembakaran Teoritis.....	33
Tabel 3.17	Panas Keluar pada <i>Kiln Exhaust Gas</i>	34
Tabel 4.1	Neraca Panas (<i>Heat Balance</i>) Sekam 3,4%	40
Tabel 4.2	Neraca Panas (<i>Heat Balance</i>) Sekam 3,4%	41
Tabel 4.3	Neraca Panas (<i>Heat Balance</i>) Sekam 3,4%	42
Tabel 4.4	Neraca Panas (<i>Heat Balance</i>) Sekam 3,4%	43
Tabel 4.5	Neraca Panas Variasi Penggantian Sekam.....	44
Tabel 4.6	Nilai <i>Excess Air</i> pada Penggantian Sekam	47
Tabel 4.7	Massa Gas CO ₂ Hasil Pembakaran	49

DAFTAR GAMBAR

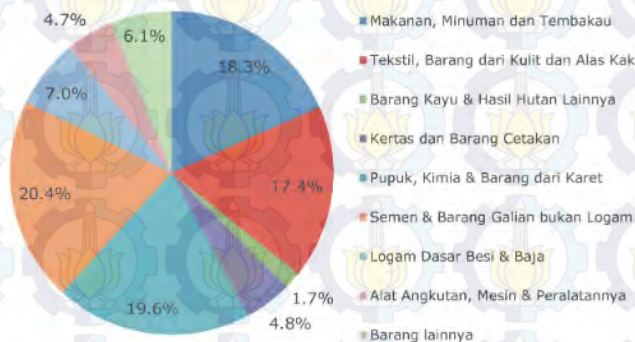
Gambar 1.1	Konsumsi energi nasional 2013	1
Gambar 2.1	Keseimbangan massa dan energi.....	6
Gambar 2.2	Proses produksi semen	8
Gambar 2.3	HMI proses pembakaran semen	10
Gambar 2.4	Aliran material sistem <i>rotary kiln</i>	12
Gambar 3.1	<i>Control volume</i> sistem.....	19
Gambar 4.1	Hasil SEC variasi bahan bakar sekam padi	46
Gambar 4.5	Pengaruh <i>excess air</i> terhadap <i>kiln exhaust gas</i>	48
Gambar 4.6	Pengaruh komposisi sekam terhadap CO ₂	49

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Industri di Indonesia saat ini sedang berkembang pesat dalam rangka melaksanakan pembangunan nasional. Sejalan dengan meningkatnya laju pembangunan, konsumsi energi di Indonesia juga terus meningkat dari tahun ke tahun. Peningkatan ini terjadi hampir pada semua sektor, baik sektor industri, transportasi, komersial, rumah tangga, pembangkit listrik dan sektor lainnya.

Berdasarkan buku *Outlook Energi Indonesia*, di tahun 2013 sektor industri merupakan sektor dengan pangsa konsumsi energi final terbesar yaitu sebesar 33% diikuti oleh sektor rumah tangga sebesar 27% dan sektor transportasi sebesar 27%. Sedangkan sektor komersial, sektor lain, dan penggunaan untuk bahan baku adalah 10%.



Gambar 1.1 Konsumsi energi nasional pada tahun 2013

Tingginya konsumsi energi di sektor industri memungkinkan terjadinya pemborosan energi yang besar pula. Sehingga diperlukan upaya untuk dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada industri. Di tahun 2013, kementerian ESDM mengelompokkan industri di Indonesia menjadi Sembilan kategori. Dari kesembilan kategori tersebut, industri semen dan barang galian bukan logam menduduki peringkat teratas sebagai

industri mengkonsumsi energi terbesar. Pada gambar 1.1 berikut, ditampilkan besar konsumsi energi pada berbagai sektor industri^[1].

Industri semen adalah industri yang proses produksinya merupakan *high energy* karena membutuhkan banyak bahan bakar, baik pada preheater maupun Kiln (pembakar utama). Sekitar 30 – 40 % dari *total production cost* produksi semen hanya digunakan untuk membiayai kebutuhan bahan bakar^[2]. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pembakaran pada produksi semen memerlukan pengelolaan energi yang baik, agar dapat dapat diminimalisir biaya produksi dan juga gas berbahaya yang dibuang.

Berdasarkan kondisi tersebut dibutuhkan sebuah konservasi energi. Konservasi energi adalah sebuah upaya sistematis, terencana, dan terpadu guna melestarikan sumber daya energi dalam negeri serta meningkatkan efisiensi pemanfaatannya (sesuai UU no 30 tahun 2007). Upaya tersebut dapat tercapai dengan 2 cara, cara makro seperti pemerintah membuat sebuah kebijakan-regulasi, seperti Permen ESDM no 14 tentang manajemen energi dan cara mikro seperti melakukan audit energi.

Audit energi merupakan metode untuk mengidentifikasi *heat losses* pada suatu sistem. Dengan audit energi, daerah yang mengalami penurunan performansi dan pemborosan konsumsi energi akan diketahui. Sehingga dapat diberikan peluang penghematan energi sehingga dapat meminimalisir biaya yang digunakan untuk produksi.

Audit energi yang dilakukan pada penelitian ini, divariasikan berdasarkan penggunaan bahan bakar alternatif yang digunakan pada proses pembakaran. Proses ini dikenal dengan istilah *co-processing*. *Co-processing* merupakan suatu metode pemusnahan limbah melalui pembakaran terkendali yang sekaligus meningkatkan nilai tambah limbah dalam bentuk *recovery* energi dan material untuk bahan baku proses produksi^[2].

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang di atas, maka permasalahan yang dapat diambil yaitu:

- bagaimana neraca panas pada proses pembakaran terak di industri semen?
- bagaimana pengaruh penggantian bahan bakar alternatif terhadap *specific thermal energy consumption*?
- bagaimana meningkatkan efisiensi pabrik semen?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- audit energi dilakukan pada pabrik semen di Jawa Timur dengan kapasitas produksi 2,3 Mt/y
- sistem meliputi *preheater*, *rotary kiln*, dan *cooler*.
- data yang digunakan adalah data pada bulan Mei-Juni 2015
- jenis kiln SLC-IL untuk *dry process*

1.4 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian tugas akhir ini ada dua, antara lain:

- melakukan audit energi untuk mengetahui neraca panas pada proses pembakaran terak di industri semen
- mengetahui pengaruh penggantian bahan bakar alternatif terhadap *specific thermal energy consumption*
- memberikan saran guna meningkatkan efisiensi energi pada pabrik semen



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Audit Energi

Audit Energi adalah proses evaluasi pemanfaatan energi dan identifikasi peluang penghematan energi serta rekomendasi peningkatan efisiensi pada pengguna energi dan pengguna sumber energi dalam rangka konservasi energi (PP No 7 tahun 2009). Audit energi berfungsi memahami profil keseluruhan konsumsi energi, seperti jenis energi yang digunakan, intensitas energi, kinerja pemanfaatan energi, potensi penghematan, dan langkah perbaikan yang perlu dilakukan. Berdasarkan tingkat kedalaman yang dihasilkan, kategori audit energi dapat diklasifikasikan menjadi 3 jenis, yaitu (Willhansen, 2012):

- *Walk Through Audit* (Audit Singkat)

Walk Through Audit merupakan jenis audit energi yang paling sederhana (level 1). Audit ini hanya melakukan pengumpulan data secara umum, melakukan pengamatan singkat secara visual tentang data historis dan melakukan wawancara.

- *Preliminary Audit* (Audit Energi Awal)

Audit energi awal merupakan jenis audit energi level kedua yang digunakan untuk mendapatkan pola penggunaan energi, melakukan identifikasi potensi penghematan serta menyusun rekomendasi awal. Audit awal membutuhkan data-data sekunder dari hasil pengukuran dan kuisioner sebagai dasar untuk melakukan evaluasi penggunaan energi secara umum dan cepat. Selain itu, melakukan interview dengan operator dapat memperdalam isi audit.

- *Detail Audit* (Audit Energi Rinci)

Audit energi rinci merupakan jenis audit energi level ketiga dan tertinggi dalam kegiatan audit energi. Audit ini digunakan untuk menginvestigasi lebih lanjut tempat terjadinya pemborosan energi dan melakukan analisis besarnya peluang penghematan energi yang dapat dilakukan secara lebih spesifik. Selanjutnya, diperoleh tempat pemborosan energi dan peluang penghematan energi serta membuat rekomendasi tindak lanjut.

2.2 Keseimbangan Massa dan Energi

Dalam sebuah sistem pembakaran material, menghitung nilai keseimbangan massa dan energi merupakan hal yang penting. Keseimbangan massa berfungsi untuk mengontrol proses yang terjadi, terutama dalam mengontrol jumlah produk dan bahan baku. Jumlah massa yang masuk harus bernilai sama dengan jumlah massa yang keluar.

$$\sum mR = \sum mP + \sum mW + \sum mS \quad (2.1)$$

dengan :

$\sum mR$ = Total Massa Bahan Baku

$\sum mP$ = Total Massa Produk

$\sum mW$ = Total Massa Limbah

$\sum mS$ = Total Massa Akumulasi

Begitupun dengan energi, jumlah energi yang masuk kedalam sistem harus bernilai sama dengan jumlah energi yang keluar ^[3].

$$\sum ER = \sum EP + \sum EW + \sum EL \quad (2.2)$$

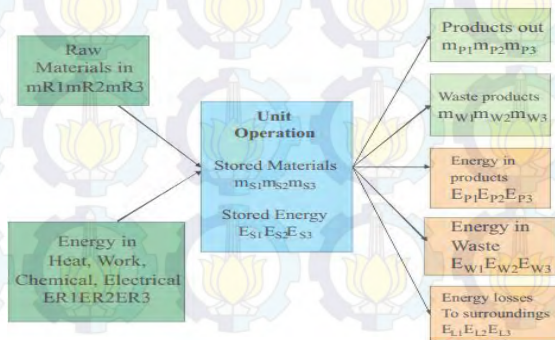
dengan :

$\sum ER$ = Total Energi Masuk

$\sum EP$ = Total Energi Produk

$\sum EW$ = Total Energi Limbah

$\sum EL$ = Total Energi Hilang



Gambar 2.1 Keseimbangan massa dan mnergi

2.3 Analisis Energi

Berdasarkan dengan hukum Thermodinamika 1 yang berisi tentang hukum kekekalan energi, energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, tetapi energi dapat di konversi kebentuk energi yang lain [3].

Dalam melakukan analisis energi yang perlu diperhatikan yaitu keseimbangan massa dan energi dari setiap proses. Untuk mempermudah analisis energi dapat dilakukan dengan persamaan laju energi per satuan waktu :

$$\dot{Q}_{cv} + \sum \dot{m}_{in} \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right) = \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_{out} \left(h_{out} + \frac{v_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) \quad (2.3)$$

Kemudian, karena dilakukan penelitian mengenai energi *thermal* maka dapat diasumsikan bahwa tidak ada energi kinetik dan potensial dalam laju energi per satuan waktu dan juga mengabaikan kerja motor yang digunakan, maka persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out} \\ \Sigma(m_{in} c_{in} \Delta T_{in}) = \Sigma(m_{out} c_{out} \Delta T_{out}) \quad (2.4)$$

dengan :

m_{in} : massa material masuk sistem (kg/kg-clinker)

c_{in} : panas spesifik material memasuki sistem (kJ/kg °C)

ΔT_{in} : temperatur material memasuki sistem (°C)

m_{out} : massa material keluar sistem (kg/kg-clinker)

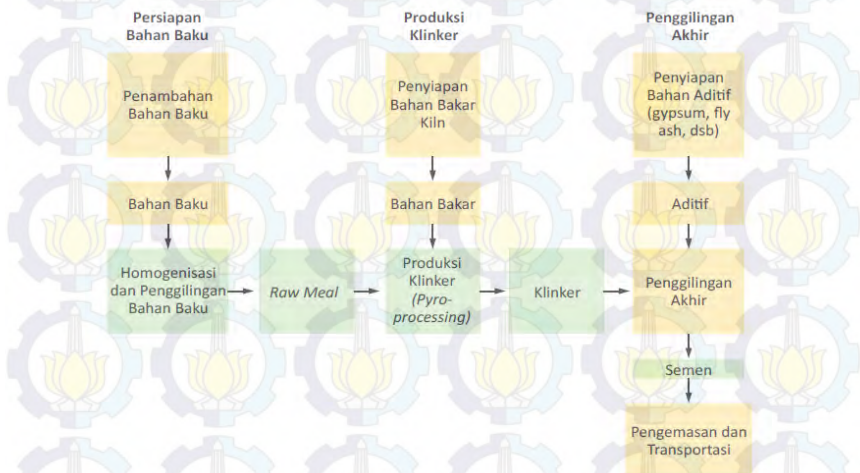
c_{out} : panas spesifik material keluar sistem (kJ/kg °C)

ΔT_{out} : temperatur material keluar sistem (°C)

2.4 Proses Produksi Semen

Pada proses produksi, material yang digunakan akan diproses secara intensif. Tahap pertama dalam proses produksi semen adalah penambangan, penggilingan dan homogenisasi bahan baku. Tahap berikutnya adalah proses kalsinasi kalsium karbonat yang dilanjutkan dengan proses sintering oksida kalsium yang dihasilkan dengan silika, alumina dan oksida besi pada temperatur tinggi (1400°C) sehingga dapat terbentuk *clinker*. *Clinker*

tersebut kemudian digiling bersama gipsium dan bahan lainnya untuk menghasilkan semen. Jumlah rata-rata bahan baku yang dibutuhkan untuk memproduksi satu ton *clinker* adalah 1,5 – 1,6 ton yang terdiri dari batu kapur, tanah liat, pasir silika dan pasir besi. Sebagian besar dari material yang diproses lepas ke udara sebagai emisi karbon dioksida (CO_2) pada reaksi kalsinasi. Gambar 2.2 adalah diagram yang menjelaskan proses produksi semen secara runtut.



Gambar 2.2 Proses produksi semen

2.5 Co-Processing

Co-processing adalah suatu metode pemusnahan limbah melalui pembakaran terkendali yang sekaligus meningkatkan nilai tambah limbah, dalam bentuk *recovery* energi dan material untuk bahan baku proses produksi. Limbah yang dapat digunakan untuk menggantikan bahan baku disebut *mineral waste*, dan limbah yang dapat digunakan untuk menggantikan bahan bakar disebut *caloric waste*.

Pembakaran limbah adalah proses oksidasi panas pada temperatur tinggi (minimal 800°C) untuk menghancurkan komponen organik dari limbah tersebut. Waktu tinggal material

(pada temperatur tinggi) minimal 2 detik. Dari persyaratan temperatur dan waktu tinggal di atas, maka proses operasi yang paling efektif dan efisien dalam mendestruksi limbah adalah di pabrik semen. ^[2]

2.6 Komponen Rotary Kiln System

Adapun komponen-komponen yang merupakan *rotary kiln system* yaitu:

- Preheater

Tipe *Suspension Preheater* yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe *double string*. Dimana tiap *string* terdiri dari empat *stage* yang dilengkapi dengan *In-Line* dan *Separate Calciner*. Gambar 2.4 di bawah ini menampilkan dua calciner yang Pada *cyclone* paling atas atau *stage* pertama terdapat dua *cyclone* (*double cyclone*) yang dipasang secara paralel. Tujuan memasang *double cyclone* pada *stage* pertama adalah untuk meningkatkan efisiensi pemisahan antara gas panas dan material di dalam *preheater*. *Stage* pertama sampai ketiga berfungsi sebagai pemanas awal umpan *kiln*, sedangkan *stage* keempat dipakai sebagai pemisah produk keluar dari *flash calciner* yang telah ter-*calcinasi*.

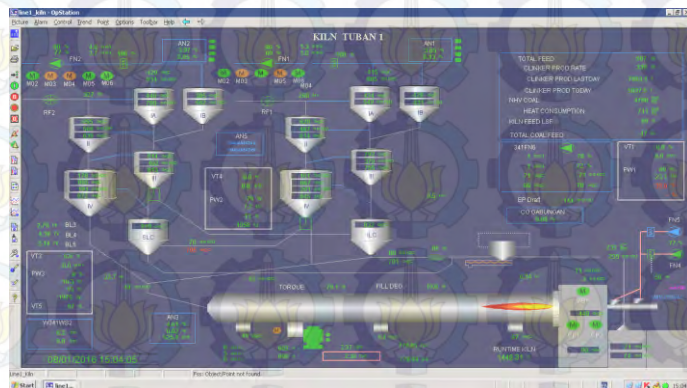
Tabel 2.1 Stage Pemanasan Preheater

Stage	Suhu Material	Suhu Gas
I	310 – 330 °C	355 – 365 °C
II	500 – 550 °C	540 – 560 °C
III	650 – 690 °C	690 – 710 °C
IV	780 – 800 °C	820 – 840 °C
Calciner	900 – 930 °C	830 – 870 °C

Perpindahan panas di dalam *cyclone*, terbesar terjadi di dalam *riser duct* masing-masing *cyclone*. Proses perpindahan panas antara gas panas dan material dingin berjalan secara *cocurrent* atau searah. Pada *down pipe* masing-masing *cyclone* dipasang *tipping valve*, sehingga ada sedikit material untuk melindungi agar tidak

terjadi aliran gas lewat *down pipe*. Dinding bagian dalam *cyclone* dan *calcliner* dilapisi oleh *refractory brick* dan *castable* yang merupakan bahan atau material yang tahan terhadap panas dan aus. Tabel 2.1 menampilkan suhu material dan suhu gas dalam *preheater*.

Pada *suspension preheater* pabrik menggunakan beberapa jenis bahan bakar untuk membantu proses pemanasan di *preheater* yaitu minyak IDO (*industrial diesel oil*) sebagai *starter* untuk mencapai suhu $\pm 400\text{--}600^\circ\text{C}$, dilanjutkan menggunakan batu bara hingga mencapai suhu maksimal *sintering zone* pada kiln sebesar 1450°C . Apabila digunakan bahan bakar alternatif (sekam padi) maka bba ini akan digunakan apabila suhu yang dihasilkan akibat penggunaan batu bara mencapai $\pm 900^\circ\text{C}$. Khusus pada *preheater* SLC digunakan bahan bakar sekam untuk membantu pembakaran.



Gambar 2.3 HMI Proses pembakaran semen

- *Rotary Kiln*

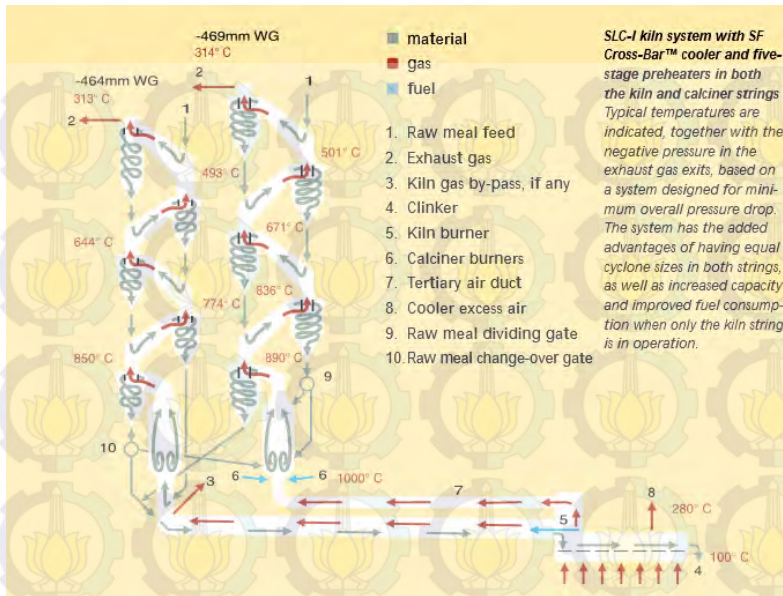
Material keluar dari *preheater* bersuhu 900°C masuk ke dalam *rotary kiln*, umpan *kiln* tersebut mengalami pemanasan oleh gas panas dari batubara hasil penggilingan *coal mill* yang ditarik oleh *fan* menuju ke *burner* untuk dibakar sebagai udara pembakar primer. Pemanasan berlangsung secara *counter current*, sehingga kontak antara panas dan umpan *kiln* lebih efisien. Akibat kontak antar partikel maka akan terjadi perpindahan panas dari gas panas

menuju ke umpan *kiln*. Umpan *kiln* terus terbakar dan meleleh hingga akhirnya akan terbentuk senyawa-senyawa semen yang disebut *clinker*.

- *Cooler*

Clinker cooler berfungsi sebagai pendingin *clinker* yang sudah terbentuk dan memproduksi udara pembakar sekunder yang digunakan dalam *rotary kiln*. *Clinker cooler* yang digunakan terdiri dari 16 kompartemen. Sebagai media pendingin, digunakan udara (*air*) yang dihasilkan oleh 14 buah *fan*. *Clinker* hasil pembakaran yang mempunyai suhu 1250°C keluar dari *rotary kiln*, dengan laju alir 390 ton/jam, langsung jatuh ke dalam *clinker cooler*.

Selanjutnya *clinker* langsung diterima oleh *grate-grate* (sarangan). Pendinginan dilakukan secara mendadak, yaitu untuk menghindari terjadinya pengerasan semen atau dekomposisi C_3S menjadi C_2S , sehingga *clinker* yang dihasilkan menjadi amorf supaya mudah digiling. Pendinginan dilakukan sampai suhu *clinker* menjadi 100°C . Keluar dari *clinker cooler*, material dibawa oleh *drag conveyor* dan dimasukkan ke dalam *clinker storage* yang berkapasitas 75.000 ton.



Gambar 2.4 Aliran material sistem *rotary kiln* ^[4]

2.7 Neraca Panas pada *Rotary Kiln System*

Neraca panas (*heat balance*) merupakan perhitungan identifikasi panas yang keluar dari sistem pembakaran. Adapun panas tersebut antara lain:

- **Panas masuk melalui pembakaran bahan bakar**

$$Q_1 = W_j \times A_j \quad (2.5)$$

dengan :

W_j = Massa bahan bakar (kg/kg of *clinker*)

A_j = Heat Value (kJ/kg-fuel)

- **Panas masuk melalui panas sensibel bahan bakar**

$$Q_2 = W_j \times c_j \times T_j \quad (2.6)$$

dengan :

W_j = Massa bahan bakar (kg/kg of *clinker*)

c_j = *specific heat* bahan bakar (kJ/kg°C)

T_f = temperatur bahan bakar (°C)

- **Panas masuk melalui *organic substance* pada *raw material***

$$Q_3 = F \times K \times h_{os} \quad (2.7)$$

dengan :

$F = 0,1$

K = prosentase kandungan organic

$h_{os} = 21.036 \text{ kJ/kg}$

- **Panas masuk melalui panas sensibel *raw material***

$$Q_4 = W_{kf} \times c_{kf} \times T_{kf} \quad (2.8)$$

dengan :

W_{kf} = Massa Raw Material (kg/kg *clinker*)

C_{kf} = *specific heat* raw material (kJ/kg⁰C)

T_{kf} = temperatur raw material (°C)

- **Panas masuk melalui udara**

$$Q_5 = w_{ud} \times c_{ud} \times T_{ud} \quad (2.9)$$

dengan :

W_{ud} = Massa udara (kg/kg-*clinker*)

C_{ud} = *specific heat* udara (kJ/kg⁰C)

T_{ud} = temperatur udara (°C)

Massa udara aktual yang memasuki sistem dapat diperoleh dengan penjumlahan massa udara yang dibutuhkan dan udara berlebih. Persamaan untuk menghitung nilai *excess air* (udara berlebih) dan udara yang dibutuhkan. Berikut ini adalah persamaan untuk menemukan nilai *excess air* berdasarkan buku *Cement Manufacturer's Handbook*.

$$m = \frac{189(2\%O_2 - \%CO)}{\%N - [1.89(2\%O_2 - \%CO)]} \quad (2.10)$$

dengan :

$m_{ar} = \text{excess air}$ (%)

%O₂ = komposisi O₂ pada gas buang (%)

CO = komposisi CO pada gas buang (%)

%N = komposisi N pada gas buang (%)

Nitrogen merupakan unsur yang terbesar pada udara. Unsur ini juga tidak bereaksi dengan unsur lain, tetapi akan langsung dibuang. Sehingga untuk menghitung prosentase nitrogen yang dikeluarkan pada gas buang, dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$N_2 = W_j \left[\frac{A_N}{100} + 3,3478(0,0267A_C + 0,01A_S + 0,08A_H - 0,01A_O) \right] \quad (2.11)$$

dengan :

A_N = komposisi N dalam bahan bakar (%)

A_C = komposisi C dalam bahan bakar (%)

A_S = komposisi S dalam bahan bakar (%)

A_H = komposisi H dalam bahan bakar (%)

A_O = komposisi O dalam bahan bakar (%)

W_j = Laju aliran bahan bakar (kg/kg-clinker)

Persamaan kebutuhan udara pada sistem pembakaran, dapat dihitung dengan persamaan dari buku *Chemical Engineers Handbook*^[6] seperti pada persamaan (2.12).

$$AFR = \frac{11.6 A_C + 34.8 \left(A_H - \frac{A_O}{8} \right) + 4.35 A_S}{100} \quad (2.12)$$

$$m_{ar} = \frac{AFR \times \% \text{batubara}}{HHV} x \quad (2.13)$$

dengan :

AFR = *air to fuel ratio* (kg air/kg fuel) (%)

m_{ar} = massa udara yang dibutuhkan (kg air/kg-clinker)

- **Panas keluar melalui *clinker***

$$Q_6 = 4.11 H_{Al} + 6.48 H_{Mg} + 7.646 H_{Ca} - 5.116 H_{Si} - 0.59 H_{Fe} \quad (2.13)$$

dengan,

H_{Al} = komposisi Al_2O_3 (%)

H_{Mg} = komposisi MgO (%)

H_{Ca} = komposisi CaO (%)

H_{Si} = komposisi Si_2O_3 (%)

H_{Fe} = komposisi Fe_2O_3 (%)

- **Panas keluar melalui *kiln exhaust gas***

$$Q_{CO_2} = w_{CO_2} \times c_j \times T_{Be}$$

$$Q_{H_2O} = w_{H_2O} \times c_j \times T_{Be}$$

$$Q_{SO_2} = w_{SO_2} \times c_j \times T_{Be}$$

$$Q_{N_2} = w_{N_2} \times c_j \times T_{Be}$$

$$Q_{excess\ air} = w_{excess\ air} \times c_j \times T_{Be}$$

$$Q_7 = Q_{CO_2} + Q_{H_2O} + Q_{SO_2} + Q_{N_2} + Q_{excess\ air} \quad (2.15)$$

dengan,

T_{Be} = temperature gas buang kiln ($^{\circ}C$)

c_j = *specific heat of kiln exit gas* (kJ/kg $^{\circ}C$)

- **Panas keluar melalui debu (*Dust*)**

$$Q_8 = m_{dust} \times c_j \times T_{Be} \quad (2.16)$$

Massa *dust*/debu yang dibuang pada proses pembakaran, dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$m_{dust} = 1 - \left[\frac{m_{cl} - m_{ash}}{m_{kf} \times (1 - \%H_2O) \times (1 - LOI)} \right] \quad (2.17)$$

dengan :

m_{dust} : massa *dust* pada kiln feed (%)

m_{cl} : massa *clinker* hasil pembakaran (kg/h)

m_{ash} : massa *ash* bahan bakar (kg/h)

m_{kf} : massa kiln feed (kg/h)

%H₂O : kandungan H₂O pada kiln feed (%)

LOI : *loss of ignition/ unburn carbon* (%)

- **Panas keluar akibat radiasi**

Pada *rotary kiln* terdapat 3 (tiga) zona pembakaran, sehingga dalam perhitungan panas yang keluar melalui radiasi dilakukan perhitungan dengan membaginya menjadi zona-zona tersebut.

$$\begin{aligned} Q_{rad1} &= s_s \vartheta (T_{Z1} - T) \frac{1}{Wcl} \\ Q_{rad2} &= s_s \vartheta (T_{Z2} - T) \frac{1}{Wcl} \\ Q_{rad3} &= s_s \vartheta (T_{Z3} - T) \frac{1}{Wcl} \end{aligned} \quad (2.18)$$

dengan,

s_s : Luas permukaan zona (m²)

ϑ : *Heat transfer coefficient* permukaan kiln (kJ/jam m² °C)

T_{Z1} : Temperatur permukaan *rotary kiln* (°C)

T : Temperatur lingkungan (°C)

Wcl : Laju aliran material (kg/jam)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahap Penelitian

Penelitian tugas akhir dengan tema audit energi *rotary kiln system* terdapat empat tahap, yaitu :

Tahap pertama adalah studi literatur. Untuk menunjang terlaksananya tugas akhir ini, maka dilakukan studi literatur dari berbagai sumber. Studi literatur tidak hanya dilakukan pada bagian awal proses pengengerjaan, namun selama pelaksanaan penelitian akan dilakukan studi literatur guna menunjang proses pengerjaan tugas akhir yang sedang dilaksanakan. Studi literatur yang dilaksanakan meliputi, pemahaman mengenai proses produksi Portland semen, perhitungan *heat balance* pada proses produksi semen, pengaruh penggantian bahan bakar alternatif (*co-processing*) terhadap konsumsi energi.

Tahap kedua adalah melakukan pengambilan data dan pengolahan data audit energi. Data didapat melalui kepala staff evaluasi proses dan kepala seksi pengendalian proses. Sedangkan Data sekunder dapat diperoleh dengan pengukuran langsung dan melalui *central control room* (CCR). Kemudian dilakukan perhitungan kesetimbangan panas atau *heat balance* pada sistem. Perhitungan ini dilakukan dengan berdasarkan buku *Cement Manufacturer's Handbook* karangan Kurt Peray. Audit energi pada penelitian ini dilakukan dengan studi kasus variasi jumlah bahan bakar yang digunakan pada *preheater* (*separated-line calciner*). Setelah perhitungan, dengan dibandingkan dengan standar.

Tahap ketiga adalah melakukan analisa dan evaluasi sistem, setelah dilakukan perhitungan neraca panas, dibandingkan pengaruh penggunaan sekam padi sebagai bahan bakar pada proses *pyroprocessing* di *preheater*. Selain itu peluang penghematan juga dilihat pada panas yang dibuang dari sistem yang berpotensi sebagai sumber energi.

Tahap keempat adalah penarikan kesimpulan dan penyusunan laporan tugas akhir, Penarikan kesimpulan dilakukan sesuai dengan hasil analisa data yang telah dilakukan. Kemudian dilanjutkan dengan penyusunan laporan merupakan tahap terakhir dari pelaksanaan tugas akhir ini. Dalam laporan memuat hasil penelitian yang telah dilaksanakan sebagaimana mestinya.

3.2 Kondisi Pembakaran pada *Rotary Kiln System*

Pada penelitian ini dilakukan penyusunan neraca panas dari sistem pembakaran semen di *rotary kiln system*. Perhitungan neraca panas dilakukan pada variasi bahan bakar sekam padi, yang mana sekam ini berfungsi sebagai pengganti bahan bakar batubara. Terdapat 4 (empat) kasus/variasi dari penelitian ini, dimana variasi sekam padi yang digunakan adalah pada penggantian kebutuhan energi pada 2%, 3,4%, 4,4%, dan 5,7%. Adapun kondisi aktual pada variasi tersebut ditampilkan pada tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Variasi Bahan Bakar

Data Aktual	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
Prosentase Sekam Padi	2 %	3,4%	4,4%	5,7%
HHV batubara (kkal/kg)	4180	4545	4180	4634
HHV Sekam (kkal/kg)	3132	3229	3132	3125
<i>Raw Material</i> (t/h)	561,52	631,8	561,13	567,4
<i>Clinker</i> (t/h)	318,8	358,4	318,3	322,1

3.3 Perhitungan Kesenjangan Energi Termal

Neraca panas atau *heat balance* dapat dihitung dengan mengetahui neraca massa pada sistem. Pada penelitian ini dilakukan perhitungan kesetimbangan energi pada tiga hari operasional dengan variasi jumlah penggunaan bahan bakar sekam

perhitungan ini dianggap tidak mengetahui berat batubara yang masuk, dan menghitung banyaknya batubara yang dibutuhkan.

Tabel 3.2 Neraca Panas *Rotary Kiln*

Panas Masuk	Panas Keluar
Pembakaran batubara	Panas produksi <i>clinker</i>
Pembakaran sekam padi	Gas buang pembakaran
Panas sensibel bahan bakar	<i>Moisture</i> pada <i>raw material</i> dan bahan bakar
Panas sensibel <i>raw material</i>	Udara panas <i>cooler</i>
<i>Organic substance</i> pada <i>raw material</i>	Debu (<i>dust</i>)
Panas sensibel udara	Radiasi <i>rotary kiln</i>

Tabel 3.3 Aliran Massa Material

Komponen	\dot{m} (ton/h)	\dot{m} (kg/kg- <i>clinker</i>)
Produk <i>clinker</i>	318,85	1
<i>Raw material</i>	561,52	1,76
Batubara ILC	8,78	0,027
Batubara SLC	23,98	0,103
Batubara <i>Kiln</i>	22,29	0,07
Sekam Padi (SLC)	1,47	0,0046

Tabel 3.3 di atas menampilkan aliran masa material yang digunakan untuk menghitung kesetimbangan energi panas. Data ini merupakan data aktual dari proses produksi semen secara kontinyu selama 8 jam. Dan perhitungan secara rinci pada penelitian ini adalah pada kondisi penggunaan sekam padi sebanyak 2% dari kebutuhan energi total.

Selain aliran material, dibutuhkan pula data hasil *proximate analysis* dan *ultimate analysis* bahan bakar pada sistem pembakaran seperti pada tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Analisa Bahan Bakar

	Parameter	Batubara	Sekam Padi
Proximate Parameter (%)	Ash	17,74	15,35
	S	0,25	0,09
	VM	38,78	-
	FC	30,54	-
	TM	12,94	17,67
GHV / HHV (kJ/kg)		17497	13110
NHV/LHV (kJ/kg)		16513	11808
Ultimate Parameter (%)	C	52,37	31,3
	H	3,07	3,97
	N	0,83	0,4
	O	13,06	31,22
	S	0,25	0,09

Adapun perhitungan dalam neraca panas (*heat balance*) pada proses pembakaran semen adalah sebagai berikut.

3.3.1 Energi panas masuk dari pembakaran batubara

Berdasarkan persamaan (2.5), panas pembakaran yang masuk ke *rotary kiln system* dihitung berdasarkan massa bahan bakar sekam dan batubara yang masuk dikalikan dengan HHV (*high heating value*) bahan bakar. Energi inilah yang diasumsikan dengan nilai x dengan satuan kJ/kg-*clinker* guna mengetahui nilai *specific energy* pada proses.

3.3.2 Energi panas masuk dari pembakaran sekam padi

Perhitungan panas sensibel sekam padi, dilakukan berdasarkan persamaan (2.5). Adapun rincian perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$Q_1 = 0,0046 \frac{kg}{kg} \times 3132 \frac{kkal}{kg} \times 4,2 \frac{kJ}{kkal} = 60,89 \text{ kJ/kg}$$

3.3.3 Energi panas masuk dari panas sensibel bahan bakar

Perhitungan panas sensibel bahan bakar hanya dilakukan pada bahan bakar batubara, karena pada sekam padi energi panas sensibel yang diberikan sangat kecil. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan ini adalah persamaan (2.6) yang mana bergantung pada massa, panas spesifik, dan temperatur. Massa pada panas sensibel dapat dihitung dengan membagi panas pembakaran terhadap nilai kalor bakar batubara (HHV). Sedangkan nilai *specific heat* (c_i) diperoleh dari grafik *mean specific heat of fuel* (Lampiran A.4).

$$\begin{aligned} Q_{\text{sensibel}} &= \frac{x}{17496.6} \cdot 1,15 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \times 30^{\circ}\text{C} \\ &= 0.00197x \text{ kJ/kg clinker} \end{aligned}$$

3.3.4 Energi panas masuk dari *organic substance in kiln feed*

Berdasarkan Buku *Cement Manufacturer's Handbook*, pada panas yang masuk pada sistem pembakaran semen terdapat panas dari *organik substance* pada material *kiln feed*. Panas ini dapat dihitung dengan persamaan (2.7). Berikut adalah rincian perhitungannya.

$$\begin{aligned} Q_3 &= 0,1 \times 0,9 \times 21.036 \\ &= 18,93 \text{ kg/kg clinker} \end{aligned}$$

3.3.5 Energi panas masuk dari *raw material*

Pada *raw material* terdapat panas sensibel yang dapat dihitung dengan persamaan (2.8). *Raw material* memiliki temperatur sekitar 90°C setelah keluar dari *blending Silo* untuk memasuki preheater. Specific heat pada kiln feed dapat diperoleh melalui grafik *Specific Heat of Raw Materials* (Lampiran A).

$$\begin{aligned} Q_4 &= 1,76 \text{ kg/kg} \times 0,86 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \times 90^{\circ}\text{C} \\ &= 136,30 \text{ kJ/kg clinker} \end{aligned}$$

3.3.6 Energi panas masuk di udara pembakaran

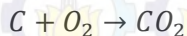
Untuk menghitung massa udara yang masuk ke dalam sistem, dibutuhkan massa *excess air* dan massa kebutuhan udara teoritis pada proses pembakaran. Besar *excess air* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.10). Tabel 3.5 berikut ini adalah data prosentase massa gas pada stack SLC dan ILC yang diperoleh dari *central control room*.

Tabel 3.5 Prosentase O₂ dan CO pada *Kiln Exit Gas*

ILC excess air	O ₂	3,009 %
	CO	0,170 %
SLC excess air	O ₂	3,9 %
	CO	0,065 %

Pada persamaan (2.10), besar *excess air* dapat dihitung dengan prosentase O₂ dan N, sedangkan data yang dimiliki hanya O₂ dan CO. Sehingga dibutuhkan persamaan stoikiometri pembakaran bahan bakar untuk memperoleh prosentase N secara teoritis. Pada reaksi berikut ini, massa dihitung CO₂, N₂, H₂O, dan SO₂ yang terbentuk pada bahan bakar. Komposisi ini berdasarkan tabel 3.4 yang menunjukkan prosentase unsur dalam bahan bakar.

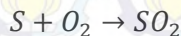
- Reaksi karbon dioksida



$$CO_2 \text{ terbentuk} = \text{Massa C} \times \text{Mr } CO_2 / \text{Mr C}$$

$$O_2 \text{ dibutuhkan} = \text{Massa C} \times \text{Mr } O_2 / \text{Mr C}$$

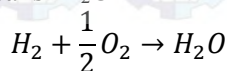
- Reaksi sulfur dioksida



$$SO_2 \text{ terbentuk} = \text{Massa S} \times \text{Mr } SO_2 / \text{Mr S}$$

$$O_2 \text{ dibutuhkan} = \text{Massa S} \times \text{Mr } O_2 / \text{Mr S}$$

- Reaksi H₂O



$$H_2O \text{ terbentuk} = \text{Massa H} \times \text{Mr } H_2O / \text{Mr H}$$

$$\text{O}_2 \text{ dibutuhkan} = \frac{1}{2} \times \text{Massa H} \times \text{Mr O}_2 / \text{Mr H}$$

Tabel 3.6 Gas Hasil Pembakaran

Ruang Bakar	Massa Gas (kg/kg-clinker)			
	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	N ₂
ILC	0,0529	0,0001	0,0076	0,14
SLC	0,149	0,0003	0,022	0,512
Kiln	0,134	0,0003	0,019	0,3553

Massa karbon, sulfur, dan hidrogen dapat diperoleh dengan mengalikan massa bahan bakar dengan komposisi unsur pada tabel 3.4. Sehingga dapat diketahui udara yang dibutuhkan untuk pembakaran. Massa N₂ yang dibuang dapat dihitung dengan persamaan (2.11). Dalam aliran gas pada *rotary kiln system*, hasil pembakaran pada *kiln* akan mengalir baik ke ILC maupun SLC. Sehingga diasumsikan aliran gas terbagi dua sama banyak. Adapun hasil komposisi udara keluar *stack* gas buang ditampilkan pada tabel 3.6. Berdasarkan nilai yang telah diperoleh, maka dengan persamaan (2.10) nilai *excess air* pada ILC dan SLC secara berturut-turut adalah

$$m_1 = \frac{189(2 \cdot 3,0 - 0,17)}{67,67 - [1,89(2 \cdot 3,0 - 0,17)]} = 19,52\%$$

$$m_2 = \frac{189(2 \cdot 3,089 - 0,06)}{67,67 - [1,89(2 \cdot 3,089 - 0,06)]} = 27,84\%$$

Kebutuhan udara minimum pada bahan bakar atau yang lebih dikenal dengan *air to fuel ratio* dapat dihitung dengan persamaan (2.12). Sedangkan kebutuhan udara aktual dalam pembakaran, diperoleh berdasarkan kebutuhan udara pada masing-masing ruang bakar. Perhitungan udara ini dianalisa berdasarkan prosentase penggunaan batubara seperti yang ditampilkan pada tabel 3.7.

Tabel 3.7 Gas Buang Reaksi Pembakaran

Unsur	ILC		SLC	
	Massa (kg/kg- clinker)	Prosentase (%)	Massa (kg/kg- clinker)	Prosentase (%)
CO ₂	0,120	25,56	0,216	25,34
SO ₂	0,0003	0,066	0,00056	0,065
H ₂ O	0,0173	3,679	0,032	3,749
N ₂	0,3177	67,677	0,573	66,9585
O ₂	0,0141	3,0091	0,0333	3,89
Total	0,4694	100	0,855907	100

Kebutuhan udara minimum pada bahan bakar atau yang lebih dikenal dengan *air to fuel ratio* dapat dihitung dengan persamaan (2.12). Sedangkan kebutuhan udara aktual dalam pembakaran, diperoleh berdasarkan kebutuhan udara pada masing-masing ruang bakar. Perhitungan udara ini dianalisa berdasarkan prosentase penggunaan batubara seperti yang ditampilkan pada tabel 3.8.

$$\begin{aligned}
 AFR_{batubara} &= \frac{11,6(52,37) + 34,8\left(3,07 - \frac{13,06}{8}\right) + 4,35(0,25)}{100} \\
 &= 6,58 \frac{\text{kg air}}{\text{kg fuel}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 AFR_{sekam} &= \frac{11,6(31,3) + 34,8\left(3,97 - \frac{31,22}{8}\right) + 4,35(0,09)}{100} \\
 &= 3,66 \frac{\text{kg air}}{\text{kg fuel}}
 \end{aligned}$$

Tabel 3.8 Prosentase Penggunaan Batubara

Komponen	Massa (kg/kg- clinker)	Prosentase (%)
ILC Coal	8,78	15,96
SLC Coal	23,98	43,56
Kiln Coal	22,29	40,48

Udara yang dibutuhkan dalam pembakaran semen dibagi menjadi lima yaitu :

- a. Udara untuk pendinginan

Udara untuk proses pendinginan, diberikan sebanyak 0,79 kg/kg-clinker. Nilai ini berdasarkan laju aliran fan yang digunakan. Sehingga panas yang masuk pada sistem yaitu.

$$Q_a = 0,79 \text{ kg/kg} \times 1 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \times 30^{\circ}\text{C} \\ = 23,7 \text{ kJ/kg}$$

- b. Udara kiln burner

Energi panas ini dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar batubara. Sehingga dibutuhkan persamaan agar dapat diperoleh panas yang mendekati aktual. Persamaan (2.13) menghasilkan massa udara actual. Sedangkan panas udara yang memasuki sistem dapat diketahui dengan mengalikan persamaan tersebut dengan temperatur dan kalor spesifik udara. Maka panas yang masuk melalui udara untuk pembakaran pada kiln adalah sebagai berikut.

$$Q_b = \frac{AFR \times (1+EA) \times \% \text{batubara}}{HHV} \times x \times c_{ud} \times T \\ = \frac{6,58 \times 0,4048}{17556 \text{ kJ/kg}} \times x \times 1 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \times 30^{\circ}\text{C} \\ = 3,3 \times 10^{-5} x \text{ kJ/kg clinker}$$

- c. Udara pada ILC

Adapun panas yang dibawa oleh udara untuk pembakaran pada ILC dapat diketahui dengan persamaan yang sama seperti pada kiln burner. Sehingga, panas yang dibawa oleh udara untuk pembakaran pada ILC adalah sebagai berikut.

$$Q_c = \frac{6,58 \times 0,1596 \times (1 + 0,195)}{17556} \times 1 \text{ kJ/kg}^0\text{C} \times 30^0\text{C}$$

$$= 7,15 \times 10^{-5} \text{ kJ/kg}$$

d. Udara pada SLC

Pada SLC udara dibutuhkan untuk pembakaran batubara dan pembakaran sekam. Sehingga, perhitungan panas masuk pada udara untuk bahan bakar adalah sebagai berikut.

- Batubara

$$Q = \frac{6,58 \times (1 + 0,278) \times 0,435}{17556} \times 1 \text{ kJ/kg}^0\text{C} \times 30^0\text{C}$$

$$= 0,0002 \text{ kJ/kg}$$

- Sekam

$$Q = AFR \times (1 + EA) \times m$$

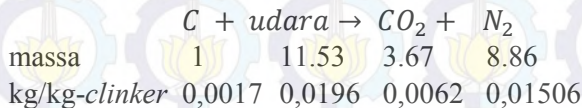
$$Q = 3,66 \times (1 + 0,278) \times 0,0046$$

$$= 0,488 \text{ kJ/kg}$$

e. Udara untuk pembakaran karbon pada *raw material*

Reaksi kalsinasi pada *rotary kiln system* akan menghasilkan karbon yang berasal dari batu kapur (CaCO_3). Udara ini termasuk dalam *excess air* yang telah diperhitungkan sebelumnya. Dalam pembakaran, karbon akan menghasilkan CO_2 dan nitrogen apabila bereaksi dengan udara seperti berikut.

Reaksi :



Berdasarkan reaksi di atas, diketahui bahwa massa udara yang dibutuhkan untuk membakar karbon adalah 0,0196 kg/kg-clinker. Sedangkan udara aktual yang diberikan pada ILC maupun SLC berturut-turut adalah sebagai berikut.

$$Q_{e1} = 0,0196 \times (1 + 0.195) \times 30 = 0,70 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{e2} = 0,0196 \times (1 + 0.278) \times 30 = 0,7502 \text{ kJ/kg}$$

Tabel 3.9 Panas Masuk melalui Udara

Udara	Q
Pendinginan	23,7
Kiln <i>burner</i>	0,0046x
ILC <i>burner</i>	0,021x
SLC <i>burner</i>	0,063x + 0,6491
raw material ILC	0,7
raw material SLC	0,75
Total	0,013x + 25,8

3.2.6 Energi panas keluar pada *clinker*

Besar energi panas pada *clinker* dapat dihitung dengan persamaan (2.14). Pada perhitungan ini dibutuhkan komposisi *clinker* yang dihasilkan pada sistem pembakaran. Tabel 3.10 menampilkan komposisi *clinker* yang dihasilkan. Berdasarkan tabel tersebut, maka perhitungan panas yang dikeluarkan untuk produksi *clinker* adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Q &= 4,11 H_{Al} + 6,48 H_{Mg} + 7,646 H_{Ca} - 5,116 H_{Si} - 0,59 H_{Fe} \\
 &= 430,91 \text{ kcal/kg} \\
 &= 1803,66 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

3.2.7 Energi panas keluar berupa gas buang

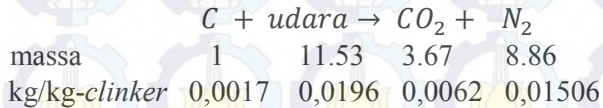
Gas buang hasil pembakaran merupakan gas-gas yang dihasilkan oleh reaksi pembakaran dan reaksi kalsinasi. Gas-gas tersebut antara lain.

- **Gas hasil pembakaran karbon pada raw material**

Pada proses pembakaran, tiga unsur dalam bahan bakar yaitu, C, H, dan S pada kondisi tertentu akan bereaksi apabila terdapat

O₂. Pada *raw material*, terdapat 0,11% kandungan karbon. Sehingga, berdasarkan reaksi stoikiometri, maka massa unsur-unsur dalam pembakaran dapat dihitung dengan reaksi berikut ini.

Reaksi :



Tabel 3.10 Komposisi *Clinker*

Komponen	Komposisi (%)
SiO ₂	20,9
Al ₂ O ₃	6,22
Fe ₂ O ₃	3,60
CaO	66,2
MgO	1,33
Na	0,01
K	0,54
Cl	0,00
SO ₃	0,25

Tabel 3.11 Hasil Pembakaran Karbon pada *Raw Material*

Stack	Produk	T (°C)	M (kg/kg)	c _p (kJ/kg °C)	Q (kJ/kg-clinker)
ILC	CO ₂	435,57	0,006	0,97	2,63
	N ₂	435,57	0,018	1,07	8,38
SLC	CO ₂	417,43	0,00623	0,97	2,52
	N ₂	417,43	0,019	1,07	8,59
Total					22,12

- **Excess air**

Excess air merupakan udara berlebih yang digunakan untuk mengendalikan pembakaran. Sehingga *excess air* tidak digunakan

untuk reaksi melainkan akan langsung dibuang pada cerobong pembuangan (*stack*). Adapun nilai *excess air* berdasarkan perhitungan pada Subbab 3.2.6 adalah 19,52% dari kebutuhan udara teoritis untuk ILC dan 27,84% untuk SLC. Sehingga, massa udara yang dibuang adalah pada Tabel 3.12 berikut ini.

Tabel 3.12 Massa *Excess Air* pada *Exhaust Gas*

Komponen	Massa			
ILC	0,0038	+	$1,166 \times 10^{-5}$	x
SLC	0,0054	+	$4,54 \times 10^{-5}$	x + 0,0101

Maka, besar energi yang dikeluarkan dihitung dengan persamaan yang sama yaitu dengan hukum termodinamika I. Dimana *specific heat* dapat dilihat pada grafik terlampir dan suhu keluaran gas diketahui berdasarkan data pengukuran.

Tabel 3.13 Panas yang Dikeluarkan *Excess Air*

Komp	T (°C)	Kg/kg <i>clinker</i>	c_j	Q (kJ/kg <i>clinker</i>)
ILC	435,57	$x1,17 \times 10^{-5} + 0,004$	1,03	$x0,0052 + 1,71$
SLC	417,43	$x4,54 \times 10^{-5} + 0,015$	1,03	$x0,0195 + 6,70$
Total				$x0,0247 + 7,41$

- **Gas hasil reaksi kalsinasi (CO₂)**

Berdasarkan reaksi kalsinasi berikut, dilakukan perhitungan hasil CO₂ dengan komposisi *raw material* belum mengalami reaksi kalsinasi. Komposisi ini dapat dilihat pada tabel 3.13. adapun reaksi kalsinasi tersebut adalah sebagai berikut.



Pada perhitungan reaksi kalsinasi, tidak semua material mengalami reaksi tersebut. *Losses* dialami akibat material ini sangat halus seperti debu, sehingga mudah terbang. Untuk mengetahui banyaknya massa *raw material* yang terbang,

dilakukan perhitungan massa *dust* atau debu dengan persamaan (2.17). Berikut ini adalah perhitungan dari persamaan tersebut.

$$m_{dust} = 1 - \left[\frac{318,85 - 9,77 - 0,23}{561,52 \times (1 - 0,005) \times (1 - 0,3518)} \right] = 0,148$$

Tabel 3.14 Komposisi *Raw Material*

<i>Raw Material</i>	%	<i>m</i> (kg/jam)
SiO ₂	13,34	74.883,33
Al ₂ O ₃	4,11	23.062,62
Fe ₂ O ₃	2,25	12.658,37
CaCO ₃	77,49	435.102,83
MgCO ₃	1,56	8.751,36
SO ₃	0,1	561,52
Na	0,19	1.048,85
K	0,39	2.217,22
Cl	0,06	329,29
H ₂ O	0,5	2.807,62
Total	99,48	561.423,02

Berdasarkan perhitungan di atas, maka massa *dust* adalah 14,8% dari massa material. Sehingga massa material setelah dikurangkan dengan massa *dust* ditampilkan pada tabel 3.15 berikut ini.

- Reaksi 1

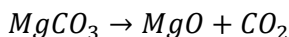


$$CaCO_3 \text{ bereaksi} = 374.693 \text{ kg/jam}$$

$$CaO \text{ terbentuk} = \text{Massa } CaCO_3 \times \frac{BM \text{ } CaO}{BM \text{ } CaCO_3} = 209.545,5 \text{ kg/jam}$$

$$CO_2 \text{ terbentuk} = \text{Massa } CaCO_3 \times \frac{BM \text{ } CO_2}{BM \text{ } CaCO_3} = 164.642,9 \text{ kg/jam}$$

- Reaksi 2



$$\text{MgCO}_3 \text{ bereaksi} = 7.526,17 \text{ kg/jam}$$

$$\text{MgO}_{\text{terbentuk}} = \text{Massa MgCO}_3 \times \frac{BM \text{ MgO}}{BM \text{ MgCO}_3} = 4.167,31 \text{ kg/jam}$$

$$\text{CO}_2 \text{ terbentuk} = \text{Massa MgCO}_3 \times \frac{BM \text{ CO}_2}{BM \text{ MgCO}_3} = 3.942,28 \text{ kg/jam}$$

$$\begin{aligned} \text{Total massa CO}_2 \text{ terbentuk} &= 168.585,19 \text{ kg/jam} \\ &= 0,5287 \text{ kg/kg-clinker} \end{aligned}$$

Tabel 3.15 Komposisi *Raw Material* (tanpa debu)

<i>Raw Material</i>	%	<i>m</i> (kg/jam)
SiO ₂	13,34	64.399,66
Al ₂ O ₃	4,11	19.833,85
Fe ₂ O ₃	2,25	10.886,20
CaCO ₃	77,49	374.188,40
MgCO ₃	1,56	7.526,17
SO ₃	0,1	482,91
Na	0,19	902,01
K	0,39	1.906,80
Cl	0,06	283,19
H ₂ O	0,5	2.414,55
Total	99,48	482.823,80

Maka panas yang dibuang akibat adanya gas karbon dioksida (CO₂) hasil reaksi kalsinasi adalah.

$$\begin{aligned} Q_{\text{CO}_2} &= W_{\text{CO}_2} \times c_j \times T_c \\ &= 0,5287 \times 0,97 \times 417,429 \\ &= 214,08 \text{ kJ/kg-clinker} \end{aligned}$$

- **Moisture raw material dan sekam padi**

Berdasarkan Tabel 3.15 di atas, diketahui bahwa komposisi H₂O dalam *raw material* adalah 0,5%. Dengan berat *raw material* 561,52 kg maka kandungan H₂O adalah 2.807,63 kg/jam atau 0,0088 kg/kg-clinker. Sedangkan untuk bahan bakar batubara tidak dapat dihitung karena tidak mengetahui massa yang

digunakan. Sehingga hanya dapat menghitung massa H_2O pada sekam padi. Berdasarkan Tabel 3.3 dan Tabel 3.4 diketahui bahwa *total moisture* dalam sekam padi adalah 0,0008 kg/kg-clinker. Sehingga massa total keduanya adalah 0,00962 kg/kg-clinker.

$$\begin{aligned} Q_{H_2O} &= W_{H_2O} \times c_j \times T_c \\ &= 0,00962 \times 1,03 \times 417,429 \\ &= 4,14 \text{ kJ/kg-clinker} \end{aligned}$$

- **Gas hasil pembakaran (reaksi bahan bakar)**

Pada dasarnya, massa gas hasil pembakaran dapat dihitung dengan reaksi stoikiometri. Namun, pada perhitungan tersebut dibutuhkan massa bahan bakar yang digunakan. Sedangkan, dalam penelitian ini, massa bahan bakar diasumsikan tidak diketahui. Sehingga perhitungan gas hasil pembakaran dilakukan berdasarkan data pembakaran teoritis pada bahan bakar umum ^[8].

Tabel 3.16 Data Pembakaran Teoritis

Bahan Bakar	kg udara/kg bahan bakar	kg Gas Buang/kg Bahan Bakar	% CO ₂ Teoritis dalam Gas Buang	% CO ₂ Aktual dalam Gas Buang
Batubara (<i>Bituminous</i>)	10,8	11,7	18,7	10-13
Batubara (<i>Lignite</i>)	8,4	9,1	19,4	9-13
Sekam Padi	4,6	5,63	19,8	14-15

Pada tabel 3.15 di atas, diketahui bahwa gas buang untuk sekam padi adalah 5,63 kg/kg-fuel. Sedangkan untuk batubara pada penelitian ini menggunakan jenis *lignite* yaitu sebesar 9,1 kg/kg-fuel. Namun, karena data di atas adalah pada kondisi *dry gas*, maka gas batubara menggunakan nilai 9,349 kg/kg-fuel^[9] dimana nilai tersebut termasuk kandungan H_2O . Total gas hasil pembakaran pada reaksi bahan bakar adalah.

$$\begin{aligned}
 Q &= W_{ghp} \times c_j \times T_c \\
 &= \left[\left(\frac{9,349x}{17497} \right) + (5,63 \cdot 0,0046) \right] \cdot 1,03 \cdot 417,43 \\
 &= (0,228x + 11,2) \text{ kJ/kg clinker}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan panas gas buang di atas, di peroleh bahwa total panas yang dibuang melalui cerobong (*stack*) preheater adalah sebagai berikut.

Tabel 3.17 Panas Keluar pada *Kiln Exhaust Gas*

Gas Buang	Q (kJ/kg-clinker)
Pembakaran Karbon pada <i>raw material</i>	22,12
<i>Excess air</i>	$x 0,0247 + 7,41$
Hasil reaksi kalsinasi (CO ₂)	214,08
<i>Moisture</i> pada <i>raw material</i> dan sekam padi	4,14
Hasil reaksi pembakaran (bahan bakar)	$x 0,228 + 11,2$
Total	$x 0,2545 + 259,95$

3.2.8 Energi panas keluar berupa udara panas dari *cooler*

Pada *rotary kiln system*, *cooler* tidak hanya berfungsi sebagai pendingin *clinker* setelah dibakar, melainkan juga sumber udara pada pembakaran. *Cooler* akan mendinginkan *clinker* atau terak yang telah mengalami reaksi kalsinasi dengan diberi udara dari *fan*. Pendinginan ini dilakukan pada ruang terbuka, sehingga udara panas dilepaskan ke atmosfer. Udara panas dari *cooler* yang dilepas ke lingkungan tidak hanya untuk proses pendinginan, melainkan juga untuk pembakaran. Transportasi udara untuk pembakaran di preheater juga terdapat bagian yang menyebabkan

adanya *losses* panas. Sehingga menambah jumlah panas yang terbuang.

- Pendinginan

Massa yang keluar untuk udara pendinginan adalah 0,79 kg/kg-*clinker* berdasarkan pengukuran. Massa ini adalah sama seperti massa udara yang diberikan untuk proses pendinginan.

$$\begin{aligned} Q_{ha} &= W_{ha} \times c_{ha} \times T_{ha} \\ &= 0,79 \times 1,01 \times 283,45 \\ &= 226,17 \text{ kJ/kg-clinker} \end{aligned}$$

- *Excess* udara tersier

Massa *excess* udara tersier merupakan data pengukuran dari pabrik semen objek penelitian.

$$\begin{aligned} Q_{ta} &= W_{ta} \times c_{ta} \times T_{ta} \\ &= 0,58 \times 1,03 \times 697,4 \\ &= 416,6 \text{ kJ/kg-clinker} \end{aligned}$$

3.2.9 Energi panas keluar berupa *dust*/debu

Pada pembakaran *raw material* semen, gas hasil proses tersebut dibuang ke atmosfer bersama debu halus yang lolos melalui *electrostatic precipitator*. Berdasarkan persamaan 2.17 massa debu yang keluar adalah sistem pembakaran dapat dihitung sebagai berikut.

$$m_{dust} = 1 - \left[\frac{318,85 - 9,77 - 0,23}{561,52 \times (1 - 0,005) \times (1 - 0,3518)} \right] = 0,148$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa massa *dust* yang dibuang adalah sebesar 14,8% dari yang masuk. Massa *raw material* yang masuk adalah 561, 52 ton/jam. Sehingga panas yang dikeluarkan adalah

$$\begin{aligned} Q_{dust} &= m_{dust} \times c_j \times T_{Be} \\ &= 83.611 \times 0,97 \times 417,429 \\ &= 106,18 \text{ kJ/kg-clinker} \end{aligned}$$

3.2.10 Energi panas keluar berupa radiasi

Pembakaran dengan suhu tinggi mencapai 1450°C menyebabkan adanya panas yang hilang akibat radiasi dari *rotary kiln*. Akibat suhu pada pembakaran ini tidak seragam, sehingga perhitungan panas radiasi dibagi menjadi tiga zona pembakaran di *rotary kiln*.

$$Q_{rad1} = \frac{\pi \cdot 84 \cdot 5,6}{3} 105(390 - 29) \frac{1}{318850} = 58,49 \text{ kJ/kg clinker}$$

$$Q_{rad2} = \frac{\pi \cdot 84 \cdot 5,6}{3} 94(330 - 29) \frac{1}{318850} = 43,6 \text{ kJ/kg clinker}$$

$$Q_{rad3} = \frac{\pi \cdot 84 \cdot 5,6}{3} 50(120 - 29) \frac{1}{318850} = 7,02 \text{ kJ/kg clinker}$$

$$\text{Total radiasi} = 58,49 + 43,6 + 7,02 = 109,11 \text{ kJ/kg-clinker}$$

Berdasarkan rincian penelitian energi panas masuk maupun keluar sistem, kemudian dilakukan perhitungan energi panas yang dibawa oleh batubara. Adapun perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} 0,255x + 2.921,699 &= 1,015x + 241,94 \\ x &= 3523,8 \text{ kJ/kg clinker} \end{aligned}$$

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Neraca Panas (*Heat Balance*) Sekam 2%

Pada industri semen, neraca kesetimbangan energi merupakan hal penting yang harus diperhatikan, karena keseimbangan energi sangat berkaitan dengan besar energi yang dihasilkan dan energi yang hilang didalam sistem. Industri semen yang merupakan industri dengan high energy. Tabel 4.1 menampilkan hasil audit energi pada *rotary kiln system* yang telah dilakukan perhitungan pada bab sebelumnya.

Hasil perhitungan yang tertera pada tabel 4.1, menunjukkan neraca panas *rotary kiln system* pada penggantian 2% batubara dengan sekam padi. Energi panas yang masuk terbesar adalah dari pembakaran batubara yaitu sebesar 3523,81 kJ/kg-*clinker*. Seperti yang telah dibahas pada bab sebelumnya, bahwa nilai tersebut diperoleh melalui identifikasi energi yang keluar pada sistem, untuk dapat mengetahui besar energi yang masuk melalui pembakaran batubara. *Pulverized weigher* merupakan alat yang digunakan untuk menimbang batubara. Dengan memperhatikan *speed motor* pada *belt conveyor*, material ditimbang dengan mengintegrasikan representatif dari sensor kecepatan dan sensor berat. Proses produksi semen yang bekerja secara kontinyu, menyebabkan kesalahan sistem pengukuran mudah terjadi. Salah satu penyebabnya adalah material belt yang mudah aus tergerus batubara sehingga beban yang diukur menghasilkan nilai yang lebih kecil dari yang semestinya.

Energi untuk proses pembakaran dibawa oleh tiga material yang memasuki sistem, yaitu bahan bakar, *kiln feed*, dan udara. Untuk mengetahui massa udara yang memasuki sistem, dapat dilakukan dengan menghitung banyak fan dan laju aliran udara yang memasuki sistem. Selain itu apabila laju aliran fan tidak diketahui, massa udara yang masuk dapat diperhitungkan dengan reaksi stoikiometri.

Tabel 4.1 Neraca Panas (*Heat Balance*) Sekam 2%

Energi Masuk	Q (kJ/kg)	Prosentase (%)
Pembakaran Batubara	3.523,81	92,28
Pembakaran Sekam Padi	60,89	1,59
Panas Sensibel Batubara	6,92	0,18
Panas pada <i>Kiln Feed</i>	136,31	3,57
Organik pada <i>Kiln Feed</i>	18,93	0,50
Panas pada Udara	71,64	1,88
Total	3.818,5	100
Energi Keluar	Q (kJ/kg)	Prosentase (%)
<i>Formulation of Clinker</i>	1.803,66	47,23
Gas Hasil Pembakaran Karbon Pada <i>Kiln Feed</i>		
CO ₂ ILC	2,63	0,07
N ₂ ILC	8,37	0,22
CO ₂ SLC	2,52	0,06
N ₂ SLC	8,58	0,22
Gas Hasil Pembakaran	820,75	21,49
CO ₂ (hasil reaksi kalsinasi)	214,08	5,61
<i>Moisture pada kiln feed & sekam</i>	4,14	0,11
<i>Excess air</i>		
ILC	20,15	0,53
SLC	75,52	1,98
<i>Hot air from cooler</i>	226,17	5,92
<i>Excess to Tertiary Air</i>	416,63	10,91
<i>Radiation from rotary kiln surface</i>	109,11	2,65
Panas yang hilang akibat debu	106,18	2,78
Total	3.818,5	100

Pada neraca energi yang keluar sistem, terlihat bahwa nilai energi panas yang dikeluarkan melalui *Separated Line Calciner* lebih besar dibanding pada *In Line Calciner*. Hal itu disebabkan

oleh sistem pembakaran pada SLC bertugas untuk membakar *raw material* dengan kapasitas yang lebih besar, yaitu 292 t/h dibandingkan dengan ILC yang hanya 269 t/h. Selain itu, pada SLC juga mengaplikasikan sistem *co-processing* yang menggunakan bahan bakar sekam padi untuk menggantikan sekitar 3% batubara. Sehingga dibutuhkan massa udara yang lebih besar pada preheater SLC.

4.2 Analisa Neraca Panas (*Heat Balance*) Sekam 3,4 %

Pada variasi sekam 3,4% merupakan kondisi yang paling berbeda dari ketiga kasus lainnya. Hal ini dikarenakan pembakaran terjadi untuk massa material paling maksimal, sehingga dalam beberapa analisa, kasus 2 ini tidak dicantumkan. Adapun hasil perhitungan untuk neraca panas (*heat balance*) pada penggantian batubara menjadi sekam padi sebesar 3,4% ditampilkan pada tabel 4.2.

Hasil perhitungan yang tertera pada tabel 4.2, menunjukkan neraca kesetimbangan energi *rotary kiln system* pada penggantian 3,4% batubara menjadi bahan bakar sekam padi. Energi panas yang masuk terbesar adalah pada pembakaran batubara yaitu sebesar 3416,7 kJ/kg-*clinker*. Menurunnya kebutuhan energi termal pada kasus ini disebabkan oleh nilai kalor pembakaran batubara yang cukup tinggi, dan juga besar *excess air* yang diberikan adalah pada rentang nilai optimal, sehingga meminimalisir *losses* yang terjadi. Variasi kedua ini dikatakan kondisi yang paling efisien mengingat kebutuhan energi yang lebih sedikit dan kalor gas buang yang sedikit pula.

4.3 Analisa Neraca Panas (*Heat Balance*) Sekam Padi 4,2%

Pada neraca panas dengan penggantian 4,2% batubara menjadi sekam padi, kondisi actual proses menyerupai pada kasus 1 atau sekam 2%, pada kalor bakar bahan bakar serta laju aliran material yang memasuki ruang bakar. Sehingga secara menyeluruh dapat dibandingkan pengaruh penggunaan sekam padi sebagai bahan bakar. Tabel 4.3 berikut merupakan hasil perhitungan neraca panas sekam 3,4%.

Tabel 4.2 Neraca Panas (*Heat Balance*) Sekam 3,4%

Energi Masuk	Q (kJ/kg)	Prosentase (%)
Pembakaran Batubara	3.416,71	90,72
Pembakaran Sekam Padi	111,14	2,95
Panas Sensibel Batubara	6,18	0,16
Panas pada <i>Kiln Feed</i>	136,49	3,62
Organik pada <i>Kiln Feed</i>	18,93	0,50
Panas pada Udara	76,77	2,03
Total	3.766,21	100
Energi Keluar	Q (kJ/kg)	Prosentase (%)
<i>Formulation of Clinker</i>	1.804,00	47,9
Gas Hasil Pembakaran Karbon Pada <i>Kiln Feed</i>		
CO ₂ ILC	2,48	0,06
N ₂ ILC	7,56	0,20
CO ₂ SLC	2,46	0,06
N ₂ SLC	7,47	0,19
Gas Hasil Pembakaran	783,67	20,80
CO ₂ (hasil reaksi kalsinasi)	208,20	5,53
<i>Moisture pada kiln feed & sekam</i>	2,4	0,06
<i>Excess air</i>		
ILC	16,58	0,44
SLC	45,04	1,19
<i>Hot air from cooler</i>	213,59	5,67
<i>Excess to Tertiary Air</i>	461,69	12,25
<i>Radiation from rotary kiln surface</i>	109,11	2,89
Panas yang hilang akibat debu	101,94	2,70
Total	3.766,21	100

Tabel 4.3 Neraca Panas (*Heat Balance*) Sekam 4,2%

Energi Masuk	Q (kJ/kg)	Prosentase (%)
Pembakaran Batubara	3440,98	90,81
Pembakaran Sekam Padi	115,76	3,05
Panas Sensibel Batubara	6,76	0,18
Panas pada <i>Kiln Feed</i>	136,45	3,60
Organik pada <i>Kiln Feed</i>	18,93	0,50
Panas pada Udara	70,25	1,85
Total	3.789,1	100
Energi Keluar	Q (kJ/kg)	Prosentase (%)
<i>Formulation of Clinker</i>	1.803,74	47,6
Gas Hasil Pembakaran Karbon Pada <i>Kiln Feed</i>		
CO ₂ ILC	2,64	0,07
N ₂ ILC	8,43	0,22
CO ₂ SLC	2,49	0,07
N ₂ SLC	8,08	0,21
Gas Hasil Pembakaran	801,68	21,16
CO ₂ (hasil reaksi kalsinasi)	211,61	5,58
<i>Moisture</i> pada <i>kiln feed</i> & sekam	3,88	0,10
<i>Excess air</i>		
ILC	14,41	0,38
SLC	67,17	1,77
<i>Hot air from cooler</i>	228,19	6,02
<i>Excess to Tertiary Air</i>	424,34	11,20
<i>Radiation from rotary kiln surface</i>	109,11	2,88
Panas yang hilang akibat debu	103,33	2,73
Total	3.789,1	100

Berdasarkan hasil tabel 4.3, terlihat bahwa kebutuhan energi termal menurun untuk penambahan sekam padi. Hal ini mengindikasikan bahwa sekam padi merupakan bahan bakar alternatif

yang bermanfaat bagi proses pembakaran. Selain kebutuhan energinya, CO₂ yang dihasilkan reaksi kalsinasi juga menurun.

4.4 Analisa Kesetimbangan Energi Sekam 5,7%

Tabel 4.4 Neraca Panas (*Heat Balance*) Sekam 5,7%

Energi Masuk	Q (kJ/kg)	Prosentase (%)
Pembakaran Batubara	3.297,87	89,67
Pembakaran Sekam Padi	158,29	4,30
Panas Sensibel Batubara	5,85	0,16
Panas pada Kiln Feed	136,37	3,71
Organik pada Kiln Feed	18,93	0,51
Panas pada Udara	60,54	1,65
Total	3.677,85	100
Energi Keluar	Besar (kJ/kg)	Prosentase (%)
<i>Formulation of Clinker</i>	1.801,04	48,97
Gas Hasil Pembakaran Carbon Pada Kiln Feed		
CO ₂ ILC	2,65	0,07
N ₂ ILC	7,98	0,22
CO ₂ SLC	2,56	0,06
N ₂ SLC	8,20	0,22
Gas Hasil Pembakaran	720,87	19,60
CO ₂ (hasil reaksi kalsinasi)	231,91	6,31
<i>Moisture pada kiln feed & sekam</i>	3,95	0,11
<i>Excess air</i>		
ILC	8,11	0,22
SLC	44,20	1,20
<i>Hot air from cooler</i>	231,14	6,26
<i>Excess to Tertiary Air</i>	409,19	11,13
<i>Radiation from rotary kiln surface</i>	109,11	2,97
Panas yang hilang akibat debu	97,94	2,66
Total	3.677,85	100

Variasi sekam padi terbesar yaitu pada bulan Juni 2015, sebesar 5,7% dimana sekam dan batubara yang digunakan juga memiliki nilai kalor bakar yang tinggi. Kondisi ini menyebabkan distribusi panas pada ruang bakar dapat merata meskipun digunakan sekam padi sebagai pengganti batubara. Tabel 4.4 menampilkan hasil perhitungan neraca panas (*heat balance*) dari kasus 4 yaitu penggunaan sekam padi sebesar 5,7%.

Berdasarkan hasil tersebut, diperoleh bahwa kalor jenis bahan bakar mempunyai pengaruh signifikan terhadap panas yang dibuang. Hal ini terlihat dari menurunnya *specific enegy thermal* pada variasi di atas.

4.5 Analisa Neraca Panas (*Heat Balance*) pada Perubahan Prosentase Bahan Bakar Sekam Padi

Penggunaan bahan bakar alternatif pada industri semen, sudah umum digunakan di dunia sejak ± 30 tahun lalu^[7]. Meskipun demikian, di Indonesia belum menerapkan *green energy* ini secara optimal. Pada pabrik semen yang menjadi objek penelitian ini menggunakan sekam padi sebagai pengganti bahan bakar batubara pada preheaternya. Namun, pemanfaatan bahan bakar ini masih sangat minim, yaitu antara 3-5% dari kebutuhan batubara. Berikut ini adalah hasil perhitungan neraca energi menggunakan data actual produksi, pada Mei dan Juni 2015. Perhitungan neraca energi ini merupakan rata-rata dari produksi semen selama delapan jam. Variasi prosentase sekam padi adalah pada penggantian bahan bakar sebesar 2%, 3,4%, 4,2%, dan 5,7% dari kebutuhan batubara. Tabel 4.5 di bawah ini menampilkan perbandingan dari neraca panas pada semua variasi bahan bakar. Hal ini bertujuan untuk dapat melihat fluktuasi kalor yang keluar-masuk sistem.

Berdasarkan neraca panas pada tabel 4.5 diketahui bahwa *specific energy consumption (thermal)* pada produksi semen akan semakin kecil apabila semakin banyak menggunakan bahan bakar alternatif. Hal tersebut dikarenakan penggunaan sekam padi akan menurunkan emisi gas karbon dioksida. Meski terjadi penurunan nilai *specific energy* untuk setiap penambahan sekam, namun hal ini tidak terjadi pada semua energi keluar ataupun masuk.

Tabel 4.5 Neraca Panas Variasi Penggantian Sekam

Energi Masuk	Prosentase Sekam Padi			
	2%	3,4%	4,2%	5,7%
Pembakaran Batubara	3.523,81	3.416,71	3.440,98	3.297,87
Pembakaran Sekam Padi	60,89	111,14	115,76	158,29
Panas Sensibel Batubara	6,92	6,18	6,76	5,85
Panas pada Kiln Feed	136,31	136,49	136,45	136,37
Organik pada Kiln Feed	18,93	18,93	18,93	18,93
Panas Udara Masuk	71,64	76,77	70,25	60,54
Total	3.818,5	3.766,21	3.789,1	3.677,85
Energi Keluar	Q (kJ/kg)			
	2%	3,4%	4,2%	5,7%
<i>Formulation of Clinker</i>	1.803,66	1.804,00	1.803,74	1.801,04
GHP Carbon Pada Kiln Feed	2,63	2,48	2,64	2,65
CO ₂ ILC				
N ₂ ILC	8,37	7,56	8,43	7,98
CO ₂ SLC	2,52	2,46	2,49	2,56
N ₂ SLC	8,58	7,47	8,08	8,20
GHP	820,75	783,67	801,68	720,87
CO ₂ (hasil reaksi kalsinasi)	214,08	208,20	211,61	231,91
Moisture in kiln feed and fuel	4,14	2,4	3,88	3,95

Tabel 4.5 (Lanjutan)

<i>Excess Air</i>				
ILC	20,15	16,58	14,41	8,11
SLC	75,52	45,04	67,17	44,20
<i>Hot air from cooler</i>	226,17	213,59	228,19	231,14
<i>Excess to Tertiary Air</i>	416,63	461,69	424,34	409,19
<i>Radiation from kiln surface</i>	109,11	109,11	109,11	109,11
Panas yang hilang akibat debu	106,18	101,94	103,33	97,94
Total	3.818,5	3.766,21	3.789,1	3.677,85

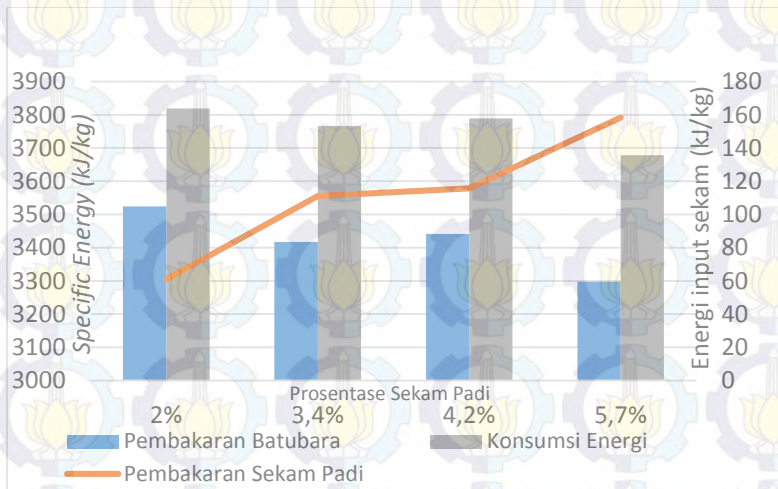
Salah satu contoh peningkatan yang terjadi adalah pada panas yang dibuang pada gas hasil pembakaran. Panas ini tidak semakin berkurang seiring dengan peningkatan bahan bakar. Banyak faktor yang menyebabkan adanya nilai gas hasil pembakaran, salah satunya adalah HHV bahan bakar.

Keempat variasi bahan bakar tersebut memiliki banyak perbedaan pada komposisi material maupun jumlahnya, sehingga tidak semua komponen panas bergantung pada bahan bakar. Secara kasat mata, hasil pada variasi yang kedua menunjukkan hasil yang berbeda dari yang lain. Salah satu penyebabnya adalah *excess air* yang masuk pada kasus tersebut adalah yang tergolong kecil diantara yang lainnya yaitu 14,5% pada ILC dan 13,8% pada SLC, sehingga panas yang terbuang tidak sebesar panas yang lain. Apabila *excess air* terlalu banyak, akan menyebabkan gas yang dikeluarkan dari sistem membuang panas cukup besar.

4.6 Analisa *Specific Thermal Energy Consumption*

Pada proses pembakaran *raw material* semen, besar konsumsi energi termal merupakan hal yang sangat penting. Hal

ini karena akan sangat berpengaruh pada biaya produksi semen. Berdasarkan tabel 4.5 di atas telah diketahui bahwa *specific thermal energy thermal consumption* pada pembakaran sekam padi mengalami penurunan untuk penambahan perbandingan sekam padi pada bahan bakar. Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai analisa penyebab penurunan nilai *specific thermal energy consumption* tidak sebanding lurus dengan penambahan sekam. Dan juga penyebab plant objek penelitian ini termasuk plant yang tidak efisien. Gambar berikut ini adalah hasil perhitungan *specific thermal energy consumption* (SEC) yang dilakukan pada penggantian bahan bakar batubara dengan sekam padi.



Gambar 4.1 Hasil SEC variasi bahan bakar sekam padi

Berdasarkan gambar 4.1 di atas, terlihat bahwa konsumsi energi menurun pada penambahan bahan bakar. Hal ini dikarenakan *co-processing* yang merupakan proses penggantian bahan bakar dengan limbah dapat mereduksi emisi gas yaitu CO_2 dimana pada energi panas yang dibuang pada proses ini sekitar 25% dari produksi semen adalah gas karbondioksida. Sehingga

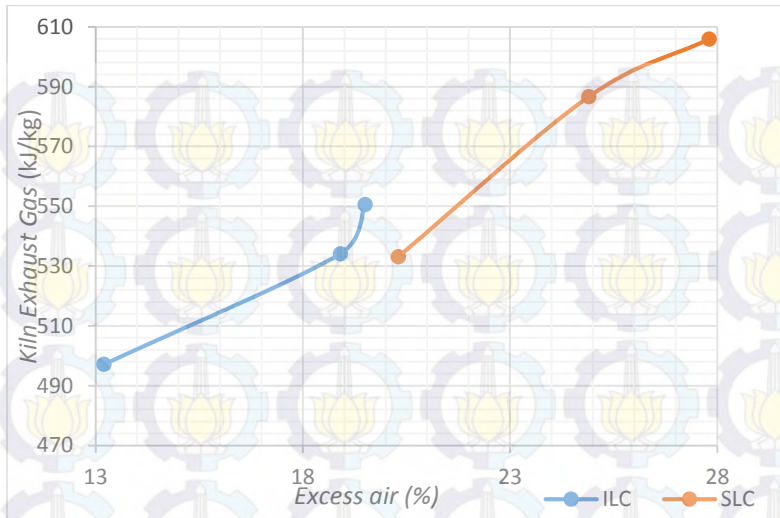
bahan bakar ini mampu mempengaruhi nilai konsumsi energi pada produksi semen. Sedangkan untuk perbandingan yang tidak linier antara penambahan prosentase sekam dengan penurunan yang terjadi disebabkan oleh fluktuasi *excess air* yang masuk pada sistem. HHV batubara dan HHV sekam padi pada kasus 2 atau sekam 3,4% adalah yang cukup tinggi bila dibanding kondisi lainnya. Hal ini menyebabkan udara yang dibutuhkan untuk proses produksi juga lebih besar. Yang menyebabkan SEC masih relevan adalah *excess air* yang dibuang keluar sistem pada kasus ini adalah yang terendah, sehingga tidak menyebabkan banyak panas yang terbuang. Berdasarkan Brenckmark yang dikeluarkan oleh UNIDO 2014, *specific thermal energy* paling efisien yaitu pada pabrik semen di Mesir dengan SEC sebesar 3,17 MJ/kg-*clinker*. Hal ini menunjukkan bahwa pabrik semen yang mejadi objek penelitian ini dikatakan tidak efisien. penyebabnya adalah penggunaan bahan bakar alternatif yang masih pada kisaran 5%. Padahal berbagai negara di dunia, terutama benua Eropa, telah menggunakan bahan bakar alternatif hingga 85% [7]. Selain itu, prosentase *excess air* yang berlebihan menyebabkan gas yang terbuang ke lingkungan lebih besar. Gas ini membawa panas yang seharusnya dapat dimanfaatkan untuk pembakaran *raw material*.

4.7 Analisa Excess Air

Excess air merupakan udara tambahan yang digunakan untuk mengendalikan pembakaran. Kelebihan udara ini diperoleh nilainya berdasarkan prosentase O₂, CO, dan N pada exhaust gas (gas buang). Apabila O₂ (udara) yang diberikan pada ruang bakar jauh lebih banyak dari kebutuhan, mengakibatkan banyak panas pada gas yang terbuang.

Tabel 4.6 Nilai *Excess Air* Pada Penggantian Sekam

<i>Excess Air</i>	Sekam 2%	Sekam 3,3%	Sekam 4,2%	Sekam 5,7%
ILC	19,51	14,5	18,9	13,2
SLC	27,8	13,8	24,9	20,3

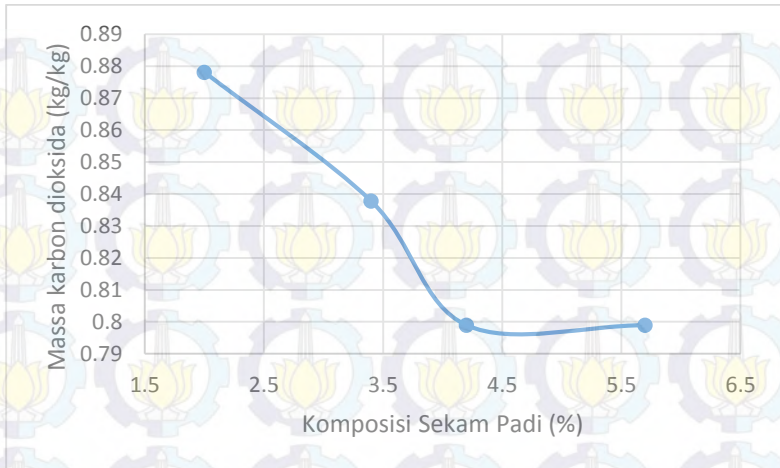


Gambar 4.2 Pengaruh *excess air* terhadap *kiln exhaust gas*

Pada gambar 4.2 terlihat bahwa pada penambahan *excess air* menyebabkan panas yang terbuang semakin besar. Hal ini dikarenakan udara yang keluar dari pembakaran membawa panas yang seharusnya dapat digunakan. Sehingga penggunaan *excess air* pada 13,2% adalah yang paling dianjurkan. Kondisi di atas adalah berturut-turut pada pembakaran sekam 5,7%, 4,2%, dan 2%. Hasil tersebut juga menunjukkan perbedaan signifikan pada kelebihan udara pada SLC dan ILC. Udara yang masuk pada SLC selalu lebih besar dibanding pada ILC karena menggunakan kombinasi bahan bakar sekam padi dan batubara. Selain itu, pada SLC sendiri bekerja untuk membakar *raw material* 15-30% lebih banyak dibanding pada ILC.

4.8 Analisa Gas Hasil Pembakaran (CO₂)

Penggunaan bahan bakar alternatif sebagai pengganti bahan bakar dilakukan untuk mereduksi emisi karbon. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, diperoleh bahwa pada pabrik semen objek penelitian, emisi karbon tereduksi 0,077 kg/kg-*clinker* untuk peningkatan penggunaan sekam sebesar 2,7%.



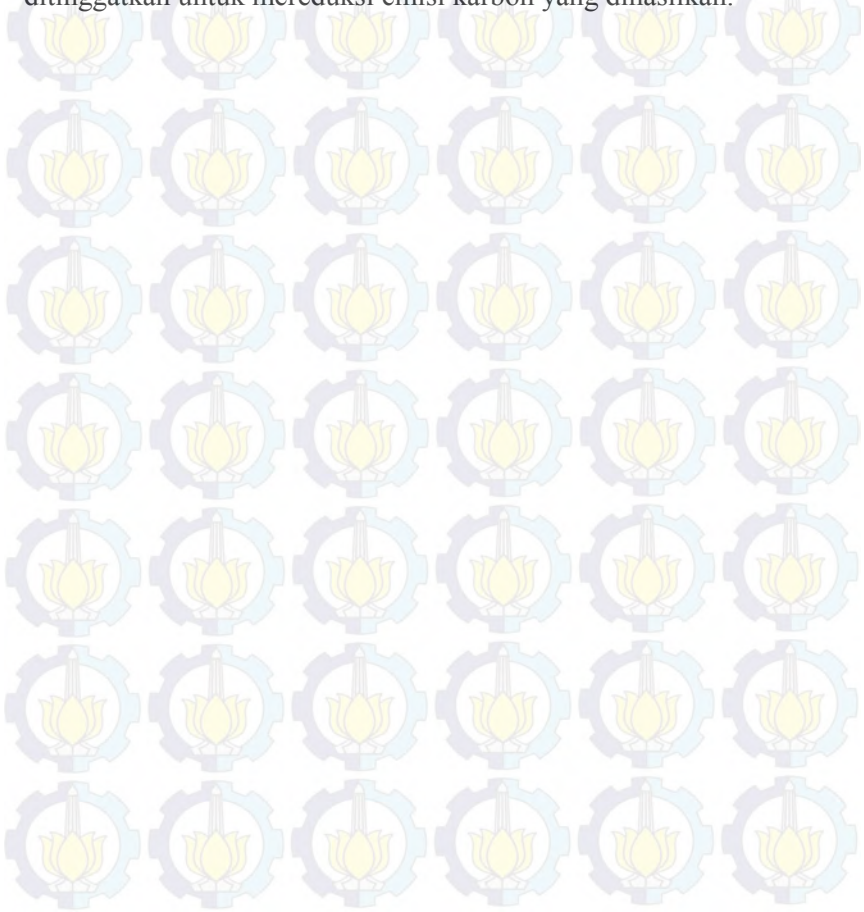
Gambar 4.4 Pengaruh komposisi sekam terhadap massa gas CO₂ hasil pembakaran

Tabel 4.5 berikut menampilkan nilai emisi yang diperoleh pada 4 (empat) variasi yang dilakukan. Pada sekam 3,3% dihasilkan emisi terbanyak karena proses produksi terak dan karakteristik bahan bakar yang dilakukan adalah pada kapasitas terbesar. Sehingga pada analisa, kondisi tersebut tidak digunakan.

Tabel 4.7 Massa Gas CO₂ Hasil Pembakaran

Komposisi	Massa CO ₂ (kg/kg-clinker)
Sekam 2%	1,008
Sekam 3.3%	1,069
Sekam 4.2 %	0,969
Sekam 5.7%	0,931

Hasil diatas merupakan gas yang dihasilkan oleh proses pembakaran semen, dimana hasil tersebut akan difilter pada *electrostatic preciperator* (EP) sebelum dibuang ke atmosfer. Berdasarkan *Internasional Energy Agency* tahun 2009, target emisi CO₂ pada industri semen adalah 0,66 kg/kg-*cement*. Sehingga sebaiknya penggunaan bahan bakar alternatif dapat ditinggatkan untuk mereduksi emisi karbon yang dihasilkan.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pada hasil penelitian tugas akhir yang sudah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Pada kondisi running optimal dengan produksi *clinker* 358,4 t/h diperlukan *energy thermal* sebesar 3766,21 kJ/kg. Konsumsi energi ini dibutuhkan pada penggunaan bahan bakar sekam padi sebanyak 3,4% untuk menggantikan batubara.
- Pengaruh penggunaan sekam padi adalah menurunkan *specific thermal energy consumption* sebesar 13,36 kJ/kg-*clinker* setiap penambahan sekam padi sebesar 1% dari kebutuhan energi total.
- Pemborosan energi terbesar terletak pada gas hasil pembakaran yang dilepas ke atmosfer sebesar 1,156 kJ/kg. Hal ini dapat diatasi dengan mengendalikan aliran udara *excess air* agar di bawah 20% untuk meminimalisir panas yang terbuang. Kebutuhan energi thermal dapat diminimalisir dengan meningkatkan prosentase bahan bakar sekam padi, maka *specific energy consumption* dan emisi karbon pada sistem sistem pembakaran akan berkurang. Peluang penghematan terdapat pada pemanfaatan gas buang dengan temperatur 417°C untuk memanaskan air untuk WHRPG.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian-penelitian berikutnya yang memiliki topik sejenis :

- a. Melakukan pemodelan pengaruh penggunaan sekam padi pada pembakaran di preheater maupun kiln
- b. Melakukan penelitian menyeluruh baik energi termal maupun energi listrik pada prose pembakaran semen.
- c. Mempersiapkan penelitian dengan lebih matang dari segi keilmuan dan waktu pengerjaan penelitian.

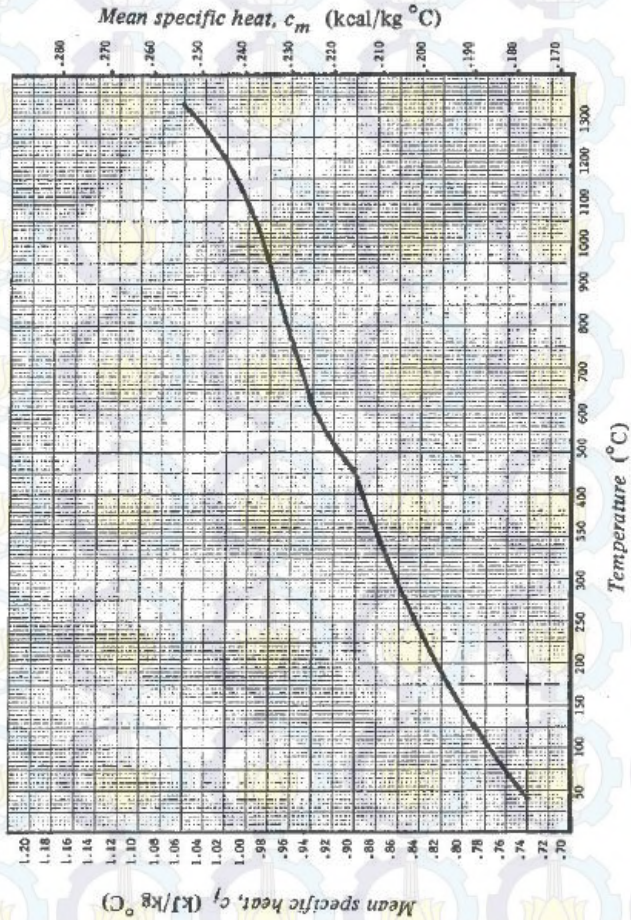
Saran untuk pabrik semen untuk dapat meminimalisir rugi panas adalah :

- Mengendalikan aliran yang masuk pada kiln (damper fan) agar *excess air* tidak lebih dari 20% karena akan menyebabkan panas yang hilang lebih besar
- Melakukan maintenance terhadap *pulverized weigher* secara berkala agar tidak terjadi kegagalan produk akibat batubara tidak terukur dengan baik
- Mengaplikasikan perbandingan terak/semen lebih rendah (meningkatkan rasio aditif/semen)
- Memisahkan CO₂ dari flue gas dan dibakar dengan O₂ di atmosfer
- Memanfaatkan gas panas yang terbuang untuk digunakan kembali pada WHRPG.

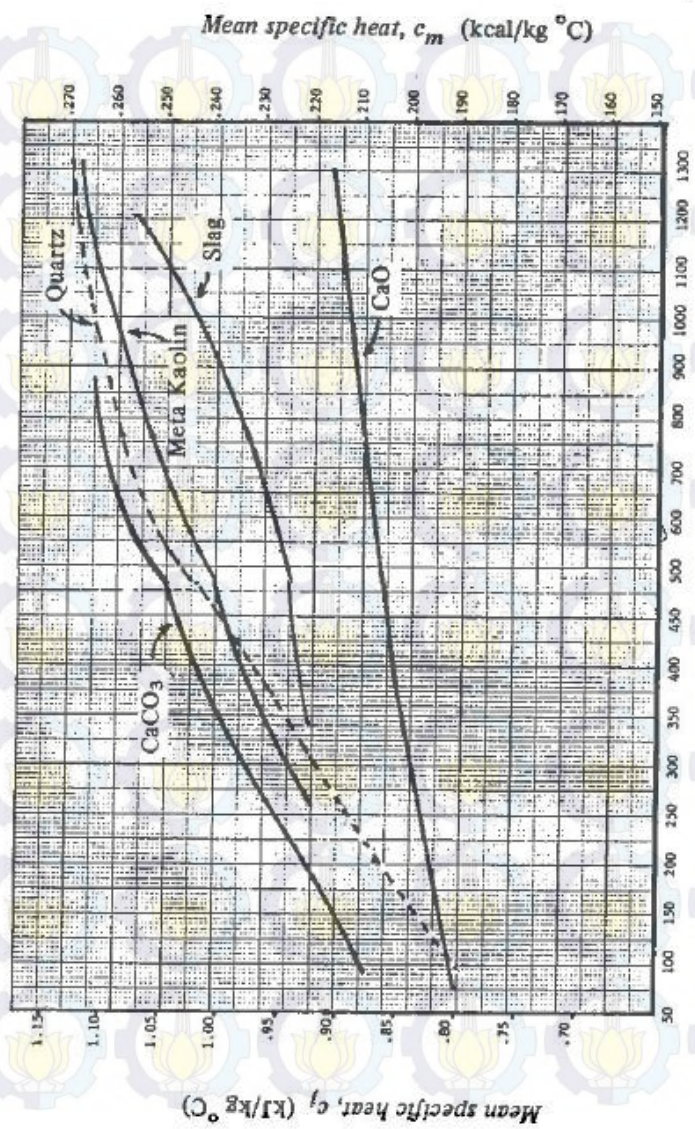
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dewan Energi Nasional. 2013. **Outlook Energi Indonesia 2013**. Kementrian ESDM Republik Indonesia
- [2] Mardiana, Gatot dan Mahardika, Rahadi. 2010. **Pemanfaatan Limbah Biomass Sebagai Bahan Bakar Alternatif dalam Kegiatan Co-processing di Semen Gresik**.
- [3] Moran, Michael J dan Shapiro, Howard N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 4th edition*. John Willey & sons Inc, New York.
- [4] FLSmidth. *Dry process kiln systems*. <url : www.flsmidth.com, diakses pada 12 Oktober 2015>.
- [5] Peray, kurt. 1979. *Cement Manufacturer's Handbook*. Chemical Publishing Co, New York.
- [6] Green and Perry. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook 8th Edition*. Mc-Graw-Hill, New York
- [7] Rahman, Azad, dkk. 2013. *"Impact of Alternatife Fuels on Cement Manufacturing Plant Performance : an Overview"*.
- [8] Madlool, NA dkk. 2011. *A Critical Review on Energy Use and Savings in the Cement Industries*. 44ty
- [9] Iskandar, Nur. 2015. *Audit Energi di Industri*. BP2TE, Jakarta
- [10] Mutiara, Farisa Ridha. 2013. *"Evaluasi Efisiensi Panas Dan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Rotary Kiln Pabrik Semen"*.
- [11] Engin, Tahsin dan Vedat Ari. 2004. "Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study."
- [12] Ariyaratne, Hiromi. Dkk. 2013. *The Effect of Alternative Fuel Combustion in the Cement Kiln Main Burner on Production Capacity and Improvement with Oxygen Enrichment*.

LAMPIRAN A SPESIFIC HEAT

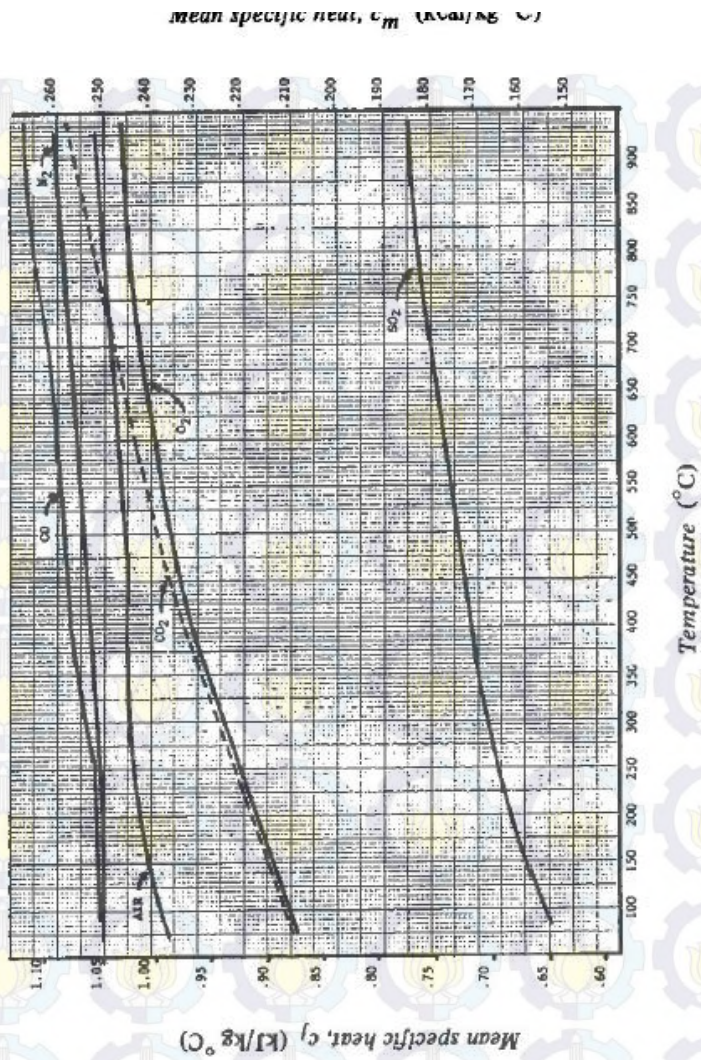


Gambar A.1 Specific heat clinker

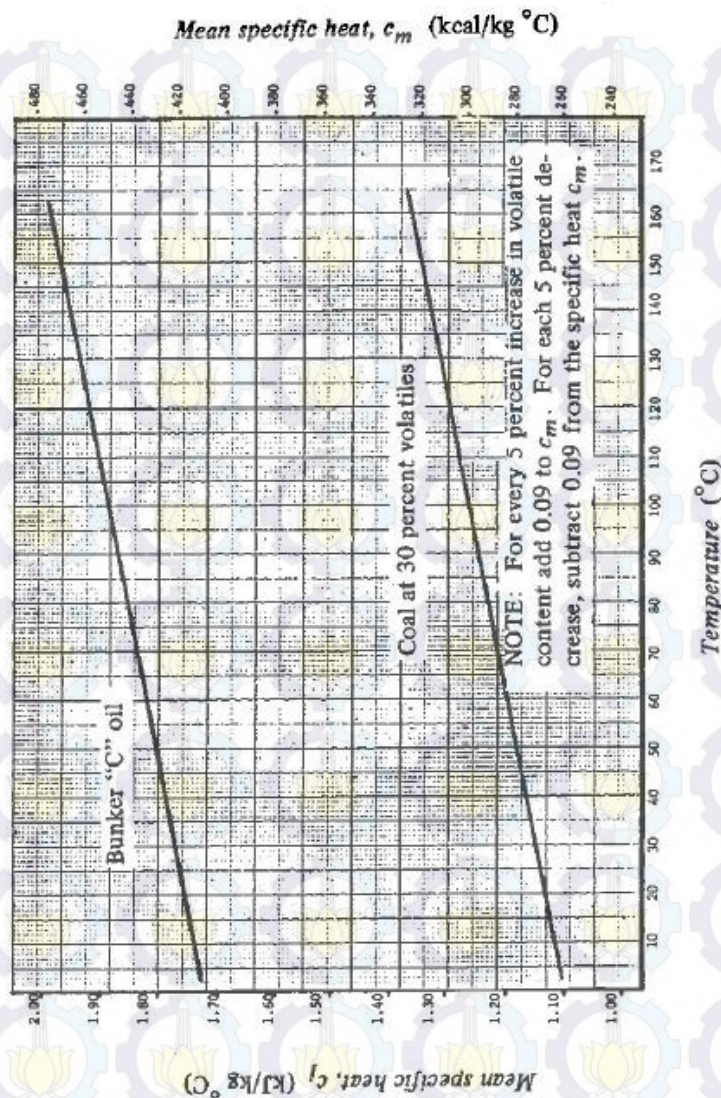


Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

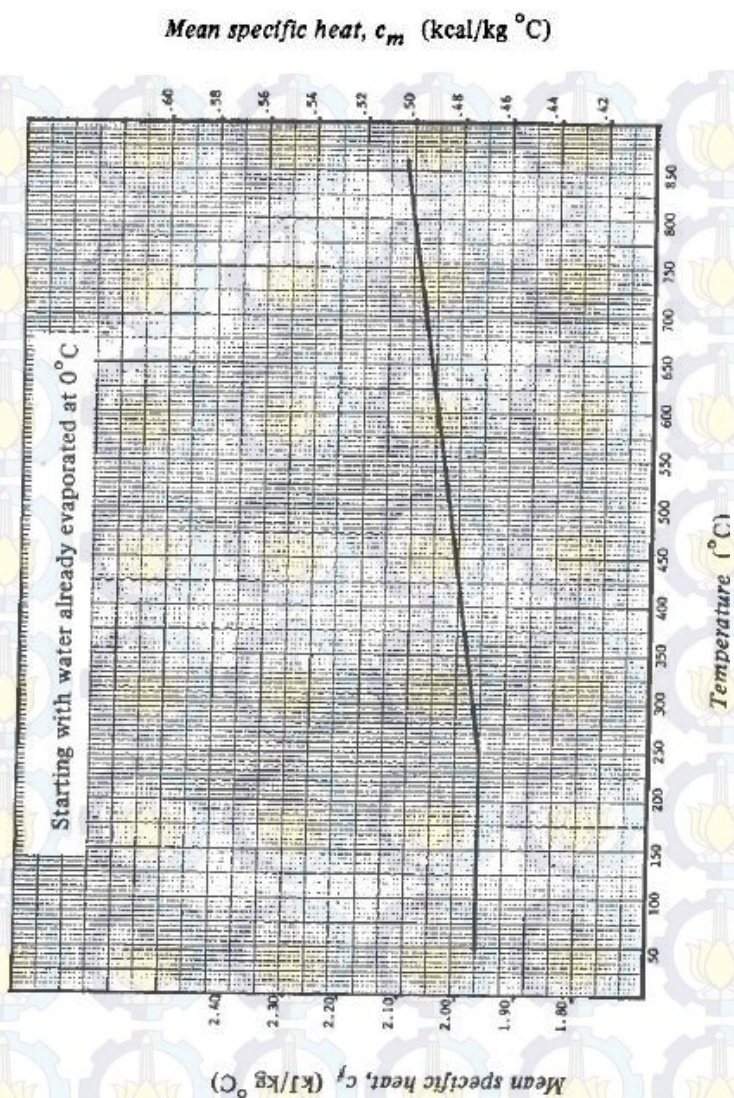
Gambar A.2 Spesific heat raw material



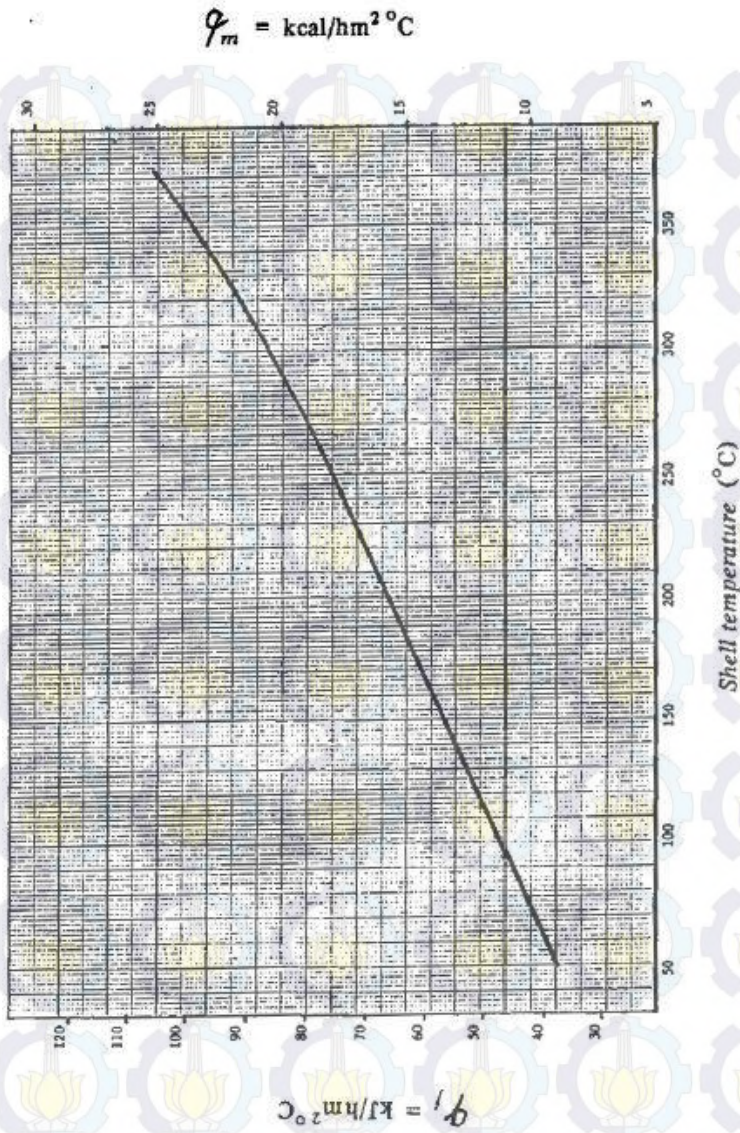
Gambar A.3 Specific heat komposisi gas buang



Gambar A.4 Spesific heat bahan bakar



Gambar A.5 Spesific heat uap air



Gambar A.6 Koefisien perpindahan panas untuk
heat loss pada *kin shell*

Tabel B.1 Data Pengukuran Kasus 1 (Sekam 2%)

No	Product Clinker	Kiln Feed	ILC Feed	SLC Feed	Sekam (BC6)	Sekam (BC7)	ILC Coal	SLC Coal	Kiln Coal	O2 ILC	CO ILC	O2 SLC	CO SLC	Temp Exit ILC	Temp Exit SLC	temp tertier SLC
No	TON	TON	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	%	%	%	%	C	C	C
1	317	558	268	290	0.0	1.5	9.4	24.1	22.5	3.0	0.2	4.0	0.1	437.0	418.8	681.0
2	316	557	269	289	0.0	0.0	9.7	23.9	22.5	2.9	0.3	4.3	0.1	437.2	417.7	702.4
3	316	558	269	289	0.0	0.0	9.5	24.4	22.5	3.0	0.2	4.3	0.1	437.4	418.0	689.6
4	317	558	269	290	0.0	0.0	9.0	23.9	22.5	3.1	0.1	4.2	0.1	437.1	417.0	702.0
5	316	556	268	288	1.1	0.0	9.1	23.6	22.4	3.0	0.2	4.2	0.1	435.6	415.7	701.6
6	322	569	271	297	0.4	2.6	8.3	24.4	22.0	3.1	0.2	3.6	0.1	433.8	417.0	694.3
7	323	568	271	297	0.0	2.5	7.4	24.4	22.0	3.1	0.1	3.2	0.1	433.5	417.6	701.2
8	323	568	272	297	3.4	0.2	8.0	23.2	21.8	2.9	0.2	3.3	0.1	433.1	417.5	707.1
AV	318.85	561.52	269.65	292.12	0.61	0.86	8.79	23.98	22.29	3.01	0.17	3.89	0.07	435.57	417.43	697.40

Tabel B.2 Data Pengukuran Kasus 2 (Sekam 3,4%)

No	Product Clinker	Kiln Feed	ILC Feed	SLC Feed	Sekam (BC7)	ILC Coal	SLC Coal	Kiln Coal	O2 ILC	CO ILC	O2 SLC	CO SLC	Temp Exit ILC	Temp Exit SLC	temp tertier SLC
No	TON	TON	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	%	%	%	%	C	C	C
1	358	631	263	368	2.5	9.2	27.0	22.5	2.4	0.1	2.4	0.1	409.0	407.8	755.9
2	358	632	263	368	2.9	9.3	26.4	22.5	2.4	0.1	2.3	0.2	409.7	407.0	759.5
3	359	633	263	369	3.0	9.2	26.1	22.5	2.4	0.1	2.3	0.1	410.1	407.8	751.2
4	359	634	263	370	2.8	9.3	26.8	22.5	2.3	0.2	2.1	0.2	410.4	408.2	756.5
5	357	630	264	366	2.6	10.0	26.9	22.1	2.4	0.1	2.2	0.2	408.8	407.9	755.1
6	358	633	264	367	2.7	9.9	26.4	22.2	2.5	0.1	2.5	0.1	410.9	406.4	759.1
7	359	631	264	368	2.4	9.9	27.7	22.3	2.4	0.1	2.2	0.2	410.5	405.9	757.7
8	358	631	263	368	2.5	9.2	27.0	22.5	2.4	0.1	2.4	0.1	409.0	407.8	755.9
AVE	358.33	631.89	263.44	368.09	2.71	9.55	26.77	22.39	2.40	0.14	2.30	0.16	409.90	407.28	756.42

Tabel B.3 Data Pengukuran Kasus 3 (Sekam 4,2%)

No	Product Clinker	Kiln Feed	ILC Feed	SLC Feed	Sekam (BC6)	ILC Coal	SLC Coal	Kiln Coal	O2 ILC	CO ILC	O2 SLC	CO SLC	Temp Exit ILC	Temp Exit SLC	temp tertier ILC	temp tertier SLC
No	TON	TON	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	%	%	%	%	C	C	C	C
1	316	558	269	287	1.0	7.2	23.2	21.4	3.1	0.1	3.6	0.1	436.0	412.7	678.5	698.0
2	316	557	270	287	1.3	6.9	23.4	21.3	3.2	0.1	3.3	0.1	437.7	413.0	653.9	680.5
3	316	558	270	287	3.4	6.3	20.2	21.3	2.8	0.1	3.6	0.1	439.2	414.5	661.6	695.4
4	319	561	269	292	3.3	4.8	20.0	21.3	2.8	0.1	3.5	0.1	439.0	414.1	677.5	709.0
5	319	562	271	292	3.5	3.6	18.9	21.3	2.7	0.1	3.6	0.1	436.3	411.9	703.6	729.4
6	320	564	271	293	3.3	3.8	19.4	21.3	2.8	0.1	3.5	0.1	435.6	410.6	712.2	740.2
7	320	565	270	295	3.3	5.6	19.9	21.4	2.9	0.1	3.7	0.1	437.9	410.2	728.4	758.7
8	320	565	270	294	3.4	5.6	19.7	21.3	2.8	0.1	3.8	0.1	440.3	410.5	708.5	727.0
AVE	318.30	561.13	270.10	290.91	2.81	5.47	20.57	21.35	2.90	0.10	3.57	0.07	437.75	412.18	690.52	717.27

Tabel B.4 Data Pengukuran Kasus 4 (Sekam 5,7%)

No	Product Clinker	Kiln Feed	ILC Feed	SLC Feed	Sekam (BC6)	ILC Coal	SLC Coal	Kiln Coal	O2 ILC	CO ILC	O2 SLC	CO SLC	Temp Exit ILC	Temp Exit SLC	temp tertier ILC	temp tertier SLC
No	TON	TON	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	%	%	%	%	C	C	C	C
1	321	565	262	304	2.3	3.2	18.0	19.0	2.3	0.1	3.4	0.2	439.2	423.1	680.8	878.4
2	321	566	262	303	4.2	3.1	18.1	19.0	2.3	0.1	3.0	0.2	438.5	424.1	684.1	877.0
3	321	565	262	304	4.4	4.4	18.0	18.9	2.2	0.1	2.9	0.3	438.1	425.5	691.5	894.7
4	321	566	262	304	4.2	6.1	18.9	18.9	2.3	0.1	3.0	0.2	438.3	423.9	695.0	879.0
5	321	565	262	304	4.1	6.9	18.4	18.9	2.1	0.2	3.0	0.2	439.0	422.9	694.9	877.4
6	326	574	264	310	3.9	6.4	17.7	18.9	1.9	0.2	3.0	0.2	436.9	421.6	693.9	882.5
7	324	570	266	304	3.4	6.3	17.6	18.9	2.0	0.2	3.0	0.2	435.2	421.5	696.7	866.4
8	322	568	267	301	3.1	4.2	15.4	18.9	2.0	0.2	3.2	0.2	436.0	422.8	696.4	870.7
ave	322.06	567.45	263.33	304.08	3.68	5.08	17.76	18.95	2.14	0.15	3.05	0.20	437.65	423.17	691.66	878.25

BIODATA PENULIS



Penulis mempunyai nama lengkap Riska Ayu, lahir di Balikpapan, tanggal 3 Agustus 1995. Putri pertama dari dua bersaudara ini melewati masa kecilnya di suatu perumahan bernama bumi Rengganis di kota Balikpapan. Jenjang pendidikannya diawali di SDN 036 Balikpapan Selatan dan dilanjutkan ke SMPN 1 Balikpapan dan SMAN 1 Balikpapan. Selama berkuliah di ITS, penulis aktif di organisasi BEM FTI ITS departemen Kominfo sejak tahun 2013 hingga 2015. Bersama departemen kominfo, penulis berhasil memenangkan *Vivat Media Award* sebagai *best social media* di tahun 2015. Selain itu, penulis juga berkecimpung di pelatihan junalistik FTI dan *Sensor crew* HMTF. Di Jurusan Teknik Fisika penulis merupakan asisten laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang juga memilih bidang minat energi pada tugas akhirnya. Hingga pada tahun 2016 penulis akhirnya melaksanakan Tugas Akhir sebagai syarat untuk menyelesaikan studi S1 di Jurusan Teknik Fisika dengan judul “Audit Energi pada *Dry Process Rotary Kiln System* di Pabrik Semen”. Bagi pembaca yang memiliki saran, kritik, atau ingin berdiskusi lebih lanjut tentang Tugas Akhir ini, maka bisa menghubungi penulis melalui nomor (08565316474) atau rskaayu@gmail.com. Terima kasih dan semoga buku ini bermanfaat bagi para pembaca.